

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Industrial

**Respuesta del generador asíncrono ante huecos
de tensión**

Autor: Miguel Ángel Sepúlveda González

Tutor: Joaquín Eloy-García Carrasco

Leganés, a 30 de Marzo de 2009

AGRADECIMIENTOS

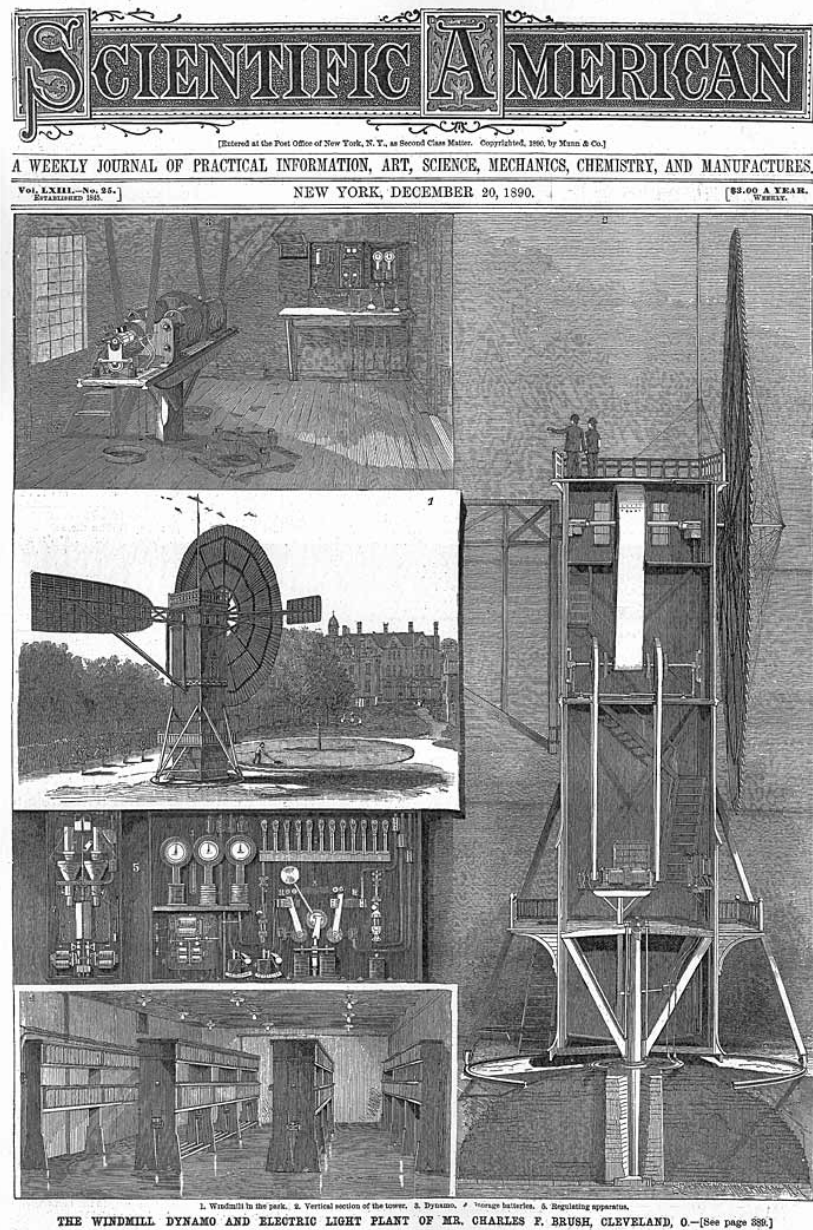
En primer lugar a todas las personas que han participado directamente en este trabajo, a mi tutor Quino, a los profesores Santiago Arnaltes, Jose Luis Rodríguez, Miguel Montilla y personal de las empresas Wind to Power System y Energy to Quality.

En segundo lugar a todos mis compañeros y amigos de la Universidad Carlos III de Madrid, en especial a Pedro, Juan, Jorge, Javi, Luís, María Luz, David, Ana, Ángel, Simón, y todos aquellos que por ser yo persona no recuerdo, pero que llevo conmigo siempre.

Y en especial a mis padres, hermanos, amigos y todos aquellos que me han tenido que soportar todos estos años.

A Cecilia no solo se lo agradezco, sino que le dedico el trabajo, la carrera y la vida.

UN POCO DE HISTORIA



Durante el invierno de 1887-88, Charles F. Brush construyó la primera turbina eólica para generación eléctrica operada de forma automática. Se trataba de un gigantesco molino, el mayor del mundo, cuyo rotor tenía 17 m. de diámetro y constaba de 144 palas de madera. La turbina funcionó durante 20 años. A pesar de su tamaño, la potencia generada alcanzaba apenas 12 kW debido a la baja velocidad de rotación de las palas. Años después, el danés Poul La Cour descubría que las turbinas compuestas de unas pocas palas con grandes velocidades de giro eran mucho más eficientes para la producción de electricidad.

Fragmento extraído de www.windpower.org

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introducción..... | 6 |
| 1.1 Antecedentes..... | 7 |
| 1.2 Objetivos..... | 8 |
| 1.3 Estructura del trabajo..... | 9 |
| 2. Los huecos de tensión..... | 10 |
| 2.1 Introducción..... | 11 |
| 2.2 Caracterización de los huecos de tensión | 12 |
| 2.3 Origen de los huecos | 13 |
| 2.3.1 Análisis de la red eléctrica ante huecos trifásicos | 14 |
| 2.3.2 Huecos desequilibrados | 18 |
| 3. El generador asíncrono. Modelado y control..... | 21 |
| 3.1 Introducción..... | 22 |
| 3.2 Ecuaciones en régimen dinámico de la máquina asíncrona | 25 |
| 3.2.1 La transformación de Park..... | 25 |
| 3.2.2 Modelo dinámico del generador asíncrono | 26 |
| 3.3 Control vectorial del generador asíncrono doblemente alimentado | 28 |
| 3.3 Control vectorial del generador asíncrono doblemente alimentado | 29 |
| 3.3.1 Aspectos sobre la orientación de los ejes d - q en el control vectorial | 30 |
| 3.3.2 Bases del control vectorial. Control independiente de P y Q | 31 |
| 3.3.3 Limitación de las corrientes de consigna..... | 32 |
| 3.3.4 Lazo de corriente | 37 |
| 3.3.4 Sistema de control completo..... | 40 |
| 4. Inicialización y validación de los modelos de simulación | 43 |
| 4.1 Introducción..... | 44 |
| 4.2 Generador asíncrono de jaula | 44 |
| 4.3 Generador asíncrono doblemente alimentado | 48 |
| 5. Resultados..... | 53 |
| 5.1 Introducción..... | 54 |

| | |
|--|----|
| 5.2 Generador asíncrono de jaula | 56 |
| 5.3 Generador asíncrono doblemente alimentado | 64 |
| 5.4 Respuesta de generadores reales ante huecos de tensión | 74 |
| 6. Conclusiones..... | 77 |
| 6.1 Síntesis..... | 78 |
| 6.2 Conclusiones..... | 79 |
| 6.3 Líneas futuras | 79 |
| 7. Bibliografía..... | 80 |
| Anexo | 83 |

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Desde que en 1888 Charles F. Brush desarrollara la primera turbina eólica de generación eléctrica los aerogeneradores han experimentado un extraordinario desarrollo, en especial durante los últimos 30 años, pasando de ser una mera curiosidad técnica a acaparar una importante cuota en la producción de electricidad. Como ejemplo, durante el año 2008 la potencia total instalada en España alcanzó un valor de 16740 MW siguiendo una tendencia proveniente de años atrás, tal y como se observa en la Fig 1.1:

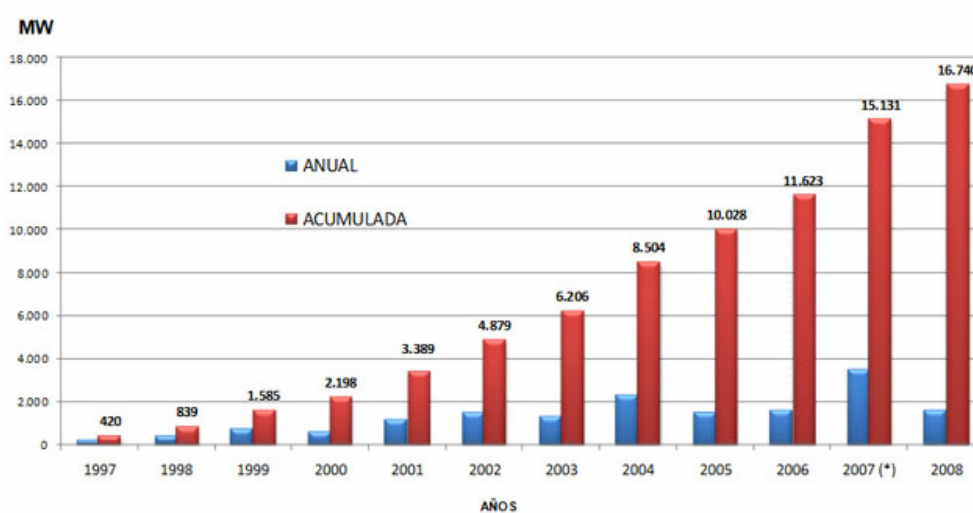


Fig 1.1. Evolución de la potencia eólica total instalada anual y acumulada en España. Fuente: Asociación Empresarial Eólica, [18]

La importancia de la generación eólica en el sistema eléctrico europeo, y en particular en el español, radica en que se ha llegado a unos niveles de cobertura de la demanda en los que se hace necesario el control y aseguramiento de la producción con el fin de mantener la estabilidad de la red. Así, el 22 de Noviembre de 2008 se produjo el record de cobertura de la demanda en el sistema español, con el 46% de la generación total de electricidad del sistema producida por energía eólica, equivalente a 9253 MW de potencia.

Como es bien sabido, en todo momento debe existir un compromiso entre la generación de electricidad y la demanda, bajo peligro de caer en desequilibrios que llegarían a provocar un colapso del sistema. Este es el caso del suceso ocurrido el 4 de noviembre de 2006 en la red eléctrica alemana, incidente que provocó la mayor parada de producción eléctrica de la historia de España, perdiendo en pocos segundos 3300 MW de potencia, el equivalente al 12% del consumo nacional. De estos 3300 MW, el 15% correspondieron a la desconexión de red de la central de ciclo combinado de Arcos de la Frontera. El resto de potencia, el equivalente a unas tres centrales nucleares a pleno rendimiento, fue el resultado de la desconexión de miles de pequeñas turbinas eólicas en toda la geografía española [19].

Hechos como el anterior han propiciado la creación de estudios y nuevos procedimientos con el fin de asegurar la estabilidad de la red [14]. Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en cuanto a la problemática de la generación eólica es la respuesta de estos generadores ante huecos de tensión. Un hueco de tensión es una

disminución brusca de la tensión hasta un nivel dado seguido de un rápido restablecimiento, y puede ser provocado por una mala operación, cortocircuitos accidentales, arranque de grandes motores, conexión de transformadores, etc. Como ejemplo ilustrativo, a continuación se muestra la pérdida de generación eólica provocada por dos faltas en una subestación:

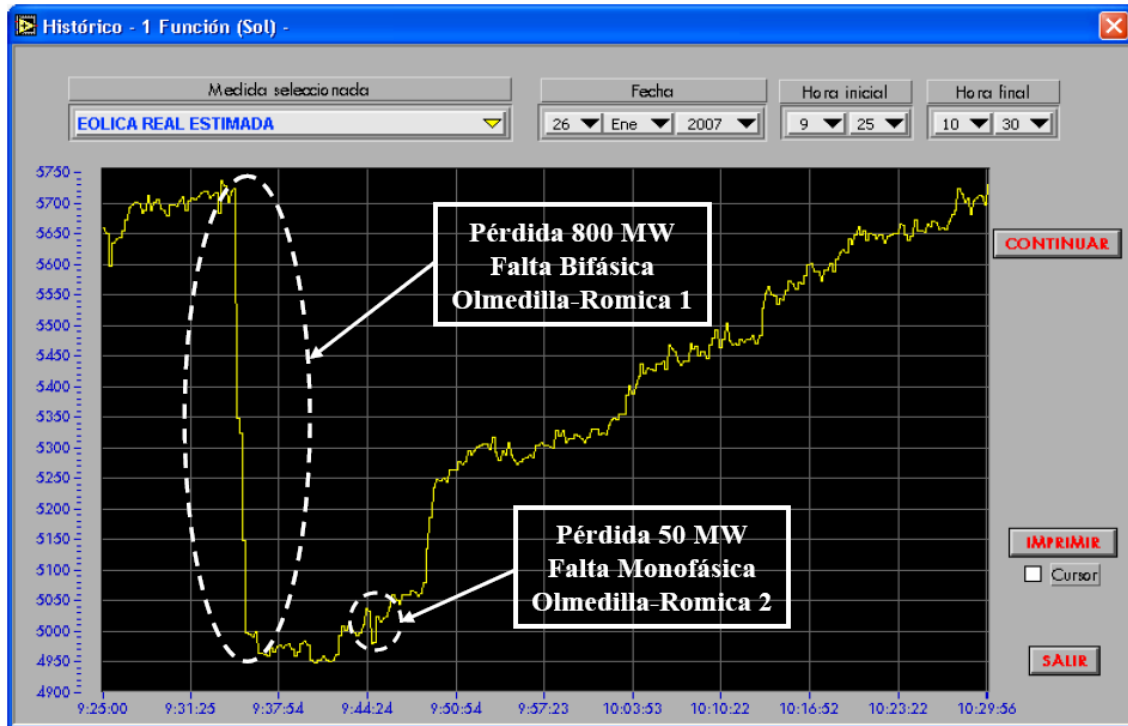


Fig 1.2. Pérdida de generación eólica provocada por dos fallos en subestación.
Fuente: Red Eléctrica de España [20].

Aunque parezca un fenómeno aislado, cada día, y varias veces al día, ocurren caídas en la tensión que podrían provocar este desequilibrio entre generación y demanda, por lo que muy frecuentemente aparece nueva normativa que cumplir por estos pequeños productores.

En este proyecto se pretende describir las razones por las que los generadores asíncronos, que forman la mayor parte de la tecnología empleada en aerogeneración, desconectan como respuesta a una perturbación en la tensión como es un hueco.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es describir, de la manera más exacta posible, la respuesta de los generadores asíncronos ante un hueco de tensión. En este sentido, se dividirá la familia asíncrona en los dos subgrupos que la forman: generadores asíncronos de jaula de ardilla y generadores asíncronos doblemente alimentados.

Provocar un hueco de tensión a una máquina asíncrona no es en absoluto recomendable, pudiendo llegar a ser un ensayo destructivo. Por esto, en este trabajo se crearán modelos de simulación de este tipo de máquinas con la herramienta *Matlab*

Simulink a partir de sus ecuaciones fundamentales. Asimismo, se empleará un modelo de generador de huecos de tensión similar al utilizado en la industria eléctrica.

Como objetivo secundario, se busca llegar a entender y describir un control vectorial básico de la máquina doblemente alimentada con todos los elementos que lo componen, como puede ser el tratamiento de las señales de consigna, limitación de las órdenes de corriente que el generador deberá obedecer, etc.

Por último, se buscará poder comparar los resultados obtenidos con resultados de ensayos de huecos de tensión reales en aerogeneradores, con el fin de validar la respuesta de las simulaciones.

1.3 Estructura del trabajo

El trabajo está estructurado en 7 capítulos y un anexo:

1. **Introducción.**
2. **Los huecos de tensión.** Presentación de los parámetros característicos de los huecos de tensión, tipos de huecos, su origen y la reducción a la red equivalente.
3. **El generador asíncrono, modelado y control.** Presentación de la máquina asíncrona, diferencia entre los dos grupos de generadores, análisis y construcción de los modelos, principios del control vectorial y desarrollo del control.
4. **Validación e inicialización de los modelos de simulación.** Selección de máquinas reales para la simulación, elaboración de programas para la inicialización y validación a partir de la comparación de la respuesta de los modelos y los datos reales de los generadores.
5. **Resultados.** Presentación de los resultados arrojados por las simulaciones ante diversos tipos de huecos de tensión a ambas máquinas. Comparación gráfica con respuestas de generadores reales ante huecos de tensión.
6. **Conclusiones.**
7. **Bibliografía.**

Anexo. Requisitos que establece el PO 12.3 de Red Eléctrica de España ante huecos de tensión de los aerogeneradores.

2. Los huecos de tensión

2.1 Introducción

La calidad de la energía ha supuesto una gran preocupación para todos los desarrolladores y gestores de la red eléctrica desde sus comienzos. Dentro de la calidad de la energía, los huecos de tensión tienen una importancia enorme porque son muy perjudiciales para casi todos los equipos que se ven sometidos a ellos. Entre los tipos de cargas que se ven afectados por los huecos y sus consecuencias se encuentran [6]:

- **Motores de inducción:** picos de intensidad, picos de par, oscilaciones en la velocidad, etc.
- **Transformadores:** picos de intensidad.
- **Motores síncronos:** picos de intensidad, de par y posible pérdida de sincronismo.
- **Convertidores electrónicos:** en muchos accionamientos de máquinas de corriente alterna, la fuente de tensión que alimenta al inversor consiste básicamente en un bus de continua que se alimenta desde un rectificador trifásico conectado a la red. Los huecos de tensión producen caídas de tensión en el bus DC que provocan variaciones en la velocidad y en el par de la máquina, y picos de corriente en el lado de alterna que pueden llegar a provocar el disparo de las protecciones.
- **Ordenadores:** pueden ocasionar desde un apagado no deseado hasta la pérdida de información o avería de alguno de sus componentes.

Por estas causas puede ser muy importante llegar a conocer la sensibilidad de los equipos a los huecos de tensión en determinado tipo de industrias, para poder hacer frente a ellos minimizando las consecuencias.

En las publicaciones relacionadas con la calidad de suministro eléctrico no existe una única definición de hueco de tensión. A modo de ejemplo se muestran dos normas:

- **Norma UNE-EN 50160:** “Disminución brusca de la tensión de alimentación a un valor situado entre el 90% y el 1% de la tensión declarada V_c , seguida del restablecimiento de la tensión después de un corto lapso de tiempo. Por convenio, un hueco de tensión dura de 10 ms. a 1 min. La profundidad de un hueco de tensión es definida como la diferencia entre la tensión eficaz mínima durante el hueco de tensión y la tensión declarada. Las variaciones de tensión que no reducen la tensión de alimentación a un valor inferior al 90% de la tensión declarada no son consideradas como huecos de tensión” [15].
- **Norma IEEE Std 1159-1995:** “Disminución de la tensión o de la corriente entre un 0.1 y un 0.9 pu a la frecuencia de la red con duraciones desde 0.5 ciclos hasta 1 minuto”.

De hecho, en el *Procedimiento de verificación, validación, y certificación de los requisitos del PO 12.3 sobre la respuesta de las instalaciones eólicas ante huecos de tensión* [11], documento que regula los ensayos a realizar en generadores eólicos en España, se define la profundidad del hueco como la caída de tensión por debajo del 85 % de la nominal, ya que la norma IEC 61000-4-30 deja libre la elección del valor a partir del cual se considera como hueco de tensión una perturbación.

Normalmente la tensión de la red eléctrica oscila entorno a su valor nominal con variaciones comprendidas en un rango máximo del $\pm 10\%$ de dicho valor. Un hueco es la bajada repentina de la tensión en una o más fases, seguida de un rápido restablecimiento en un corto espacio de tiempo. Si la tensión cae por debajo del 1%, entonces se considerará una interrupción breve (si dura menos de 3 minutos). Si está por encima del 90%, entonces se considerará que la tensión se encuentra en su rango normal de funcionamiento aunque, como ya se ha indicado, depende de la norma en uso.

2.2 Caracterización de los huecos de tensión

Haciendo una aproximación, y apoyándonos en las definiciones del apartado anterior, se puede caracterizar un hueco de tensión mediante una tensión residual o una profundidad p y una duración Δt , de modo que se puede denominar un hueco como:

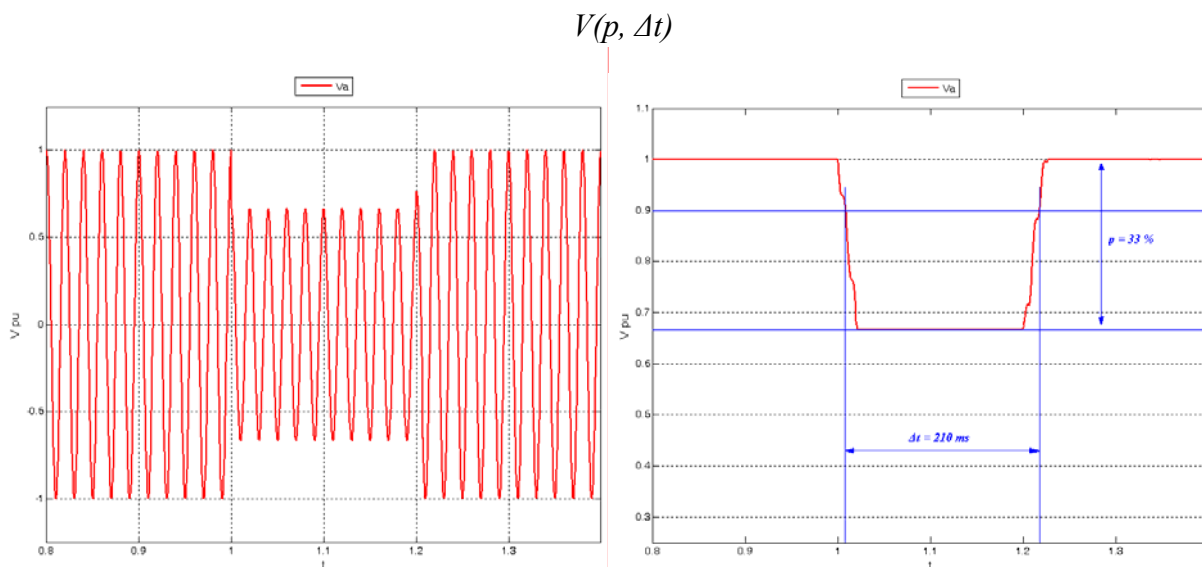


Fig 2.1. Parámetros característicos de un hueco de tensión. En este caso: $V(0.33, 210)$.

En las redes trifásicas los huecos de tensión pueden ser divididos en dos grandes categorías:

- **Huecos simétricos**, donde las tensiones de las tres fases caen en la misma proporción.
- **Huecos asimétricos**, donde las caídas de las tres fases no son iguales. Pueden ser monofásicos o bifásicos.

Normalmente los huecos que aparecen en la red son monofásicos, provocados por un cortocircuito entre una fase y tierra. Por ejemplo, la descarga de un rayo produce

sobretensiones suficientes para cebar un arco entre la fase y la torre que se encuentra conectada a tierra, lo que provoca un cortocircuito entre la línea y tierra.

Las faltas bifásicas son menos comunes, y consisten en un cortocircuito entre dos fases. La caída de vegetación o el cebado de un arco cuando dos fases se acercan demasiado debido a una ráfaga de viento son dos causas comunes de este tipo de fallos.

Finalmente, los huecos trifásicos pueden producirse cuando circulan grandes corrientes por las fases de una línea. Un ejemplo común es el arranque de grandes motores en industrias o conexión de transformadores de gran potencia.

A continuación, en la Fig 2.2 se presentan distintos tipos de huecos, con la tensión representada de forma fasorial:

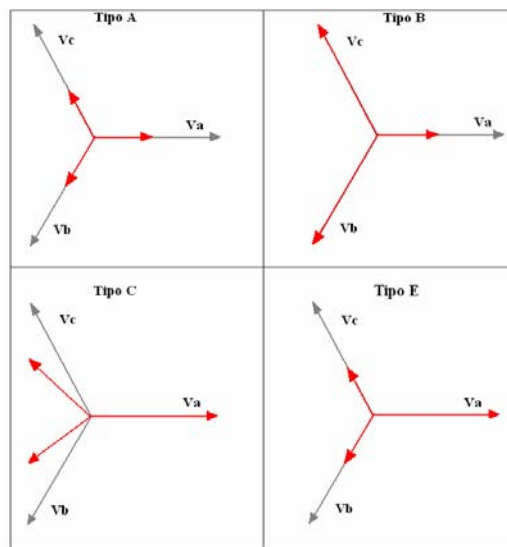


Fig 2.2. Clasificación de los huecos de tensión.

- Tipo A: Hueco trifásico.
- Tipo B: Hueco monofásico.
- Tipo C: Cortocircuito entre dos fases. En el apartado 3.3.2 se explica el acercamiento entre los fasores V_B y V_C .
- Tipo E: Cortocircuito de dos fases a tierra.

A esta clasificación se deben añadir dos tipos más de huecos si existe un transformador Δ -Y entre la falta y el punto de medida [7].

2.3 Origen de los huecos

Por la topología del sistema eléctrico, las líneas de transporte y distribución son cables aéreos que, por naturaleza, son inductivos. El agente encargado de la gestión de la red siempre tiene presente que la circulación de corrientes por las líneas provocará una caída de tensión tanto mayor cuanto mayor sea la circulación. Por esto siempre existen estrategias para el control de la tensión, como los cambiadores de tomas de los transformadores, bancos de condensadores, etc., que garantizan que la tensión siempre se encuentre dentro de los márgenes de funcionamiento normal del sistema. Sin

embargo, una gran corriente que circule de manera imprevista puede ocasionar que la tensión caiga por debajo de estos márgenes, provocando un hueco de tensión. Conceptualmente pueden distinguirse dos causas que provocan huecos de tensión:

- Grandes consumos de corriente
- Incrementos de la impedancia de la red.

Tras un análisis se puede llegar a la conclusión de que la mayoría de los huecos son provocados por la primera causa. Al hablar de un incremento de la impedancia de la red, se refiere a una conexión defectuosa o un cable o soldadura en mal estado, lo que comúnmente se denomina “punto caliente”.

Los generadores eólicos normalmente se conectan, a través del transformador principal del parque, a líneas de media o alta tensión. Por esto, los huecos que aparecen en estas instalaciones tienen su origen en la red de transporte, y las causas principales son:

- **Cortocircuitos en la red**, faltas a tierra o entre dos conductores. Representan el 70 % de los huecos e interrupciones de corta duración [3], y se deben a caídas de rayos, contactos producidos por animales, vegetación, viento, etc. Estas faltas producen caídas de tensión cuya profundidad va decayendo en función de la lejanía de la falta. La actuación de las protecciones de la red evita que sean faltas de larga duración.
- **Conexión de grandes transformadores**, que en el momento de la magnetización pueden llegar a absorber una corriente reactiva superior a 10 veces su valor nominal.
- **Fallos de los reguladores de tensión** instalados en los transformadores.

Como ejemplo ilustrativo de la dependencia de la profundidad del hueco con la distancia a la falta, a continuación se analiza una simplificación de un sistema eléctrico y se calcula la caída de tensión en función de las impedancias del sistema.

2.3.1 Análisis de la red eléctrica ante huecos trifásicos

La red eléctrica es un sistema de una extensión y una complejidad que raramente llegamos a concebir. De hecho, el ingeniero eléctrico Charles Steinmetz (1865-1923) escribió: *El sistema eléctrico norteamericano es la mayor y más complicada máquina jamás concebida por el hombre*. Por esto, estudiar su comportamiento sin realizar aproximaciones o algún tipo de cambio que ayude a simplificar el sistema es prácticamente imposible. En el caso que ocupa el presente proyecto, sólo interesa analizar el comportamiento a la frecuencia fundamental, por lo que se puede optar por aplicar el teorema de Thevenin, y reducir toda la red a un circuito equivalente compuesto por una fuente de tensión en serie con una impedancia:

- El valor de la fuente es la tensión que tenga la red en el nudo en estudio, denominado *punto de conexión común PCC*.
- La impedancia es lo que se denomina impedancia de cortocircuito de la red, y es perfectamente conocida por los operadores de las redes eléctricas para cualquier nodo de la red.

Esta impedancia de cortocircuito Z_s es la causante de la dependencia entre el nivel de tensión y la corriente circulante por el nodo.

La característica más importante de los huecos trifásicos es que tanto las corrientes como las caídas de tensión son similares en las tres fases, por lo que se puede simplificar el modelo del sistema a una sola de ellas en vez de utilizar un diagrama trifásico:

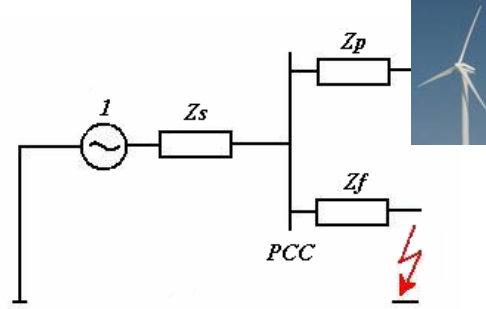


Fig. 2.3. Esquema monofásico del sistema bajo una falta trifásica.

En la figura, Z_s representa la impedancia de cortocircuito de la red vista desde el punto de conexión común PCC , Z_p es la impedancia entre el punto PCC y el parque eólico, y Z_f es la impedancia existente entre PCC y el lugar en el que ocurre el cortocircuito, más la propia impedancia de falta.

Examinando el sistema representado en la Fig. 2.3 puede deducirse que el esquema de la red ante un cortocircuito es un divisor de tensión:

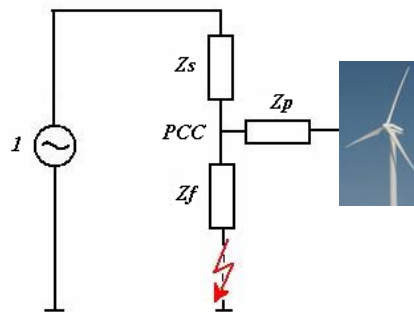


Fig. 2.4. Esquema simplificado del sistema bajo una falta trifásica.

De aquí en adelante se supondrá que las corrientes antes de la falta son mucho menores que la corriente de cortocircuito, lo que no supone un error demasiado elevado. Aplicando resolución de Teoría de Circuitos, la tensión que aparecerá en el punto PCC tras el cortocircuito será:

$$(2.1) \quad V_{PCC} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F}$$

Debe hacerse notar que, en esta expresión, los valores de las impedancias son números complejos cuya parte real denota la resistencia y la imaginaria la reactancia. La

reactancia de las líneas suele ser mucho mayor que la resistencia, por lo que las impedancias se suelen considerar como números imaginarios puros.

Gracias a la expresión (2.1) se puede calcular la profundidad del hueco conociendo las impedancias, de manera que:

$$(2.2) \quad p = 1 - \text{abs} \left(\frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \right)$$

Lo que esta expresión indica es que la profundidad del hueco de tensión será menor cuanto más pequeña sea la impedancia de cortocircuito Z_S , o cuanto más lejano sea el cortocircuito, ya que Z_F será mayor. Otra conclusión importante es que la impedancia de conexión del parque a la red, Z_P , no juega ningún papel importante en cuanto a la profundidad del hueco que se observa en PCC.

La Fig. 2.5 muestra la dependencia de la profundidad de un hueco de tensión con la distancia a través de un registro real de Red Eléctrica de España.

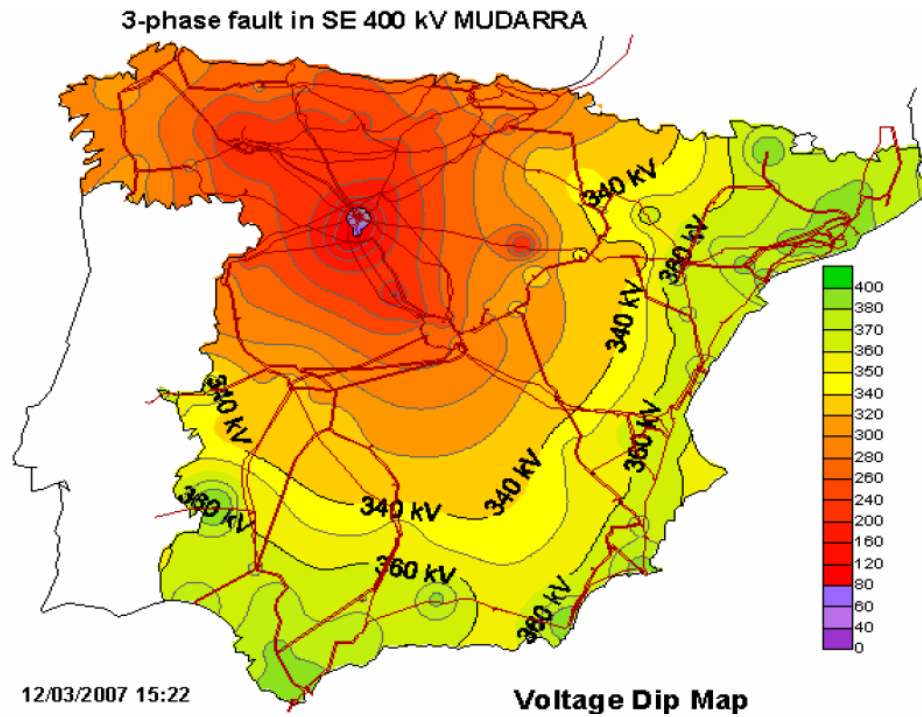


Fig. 2.5. Dependencia de la profundidad de un hueco de tensión con la distancia,
Fuente: Red Eléctrica de España.

En la Fig 2.6 se indica el modelo utilizado en las simulaciones para realizar los huecos de tensión. Esta construcción se ha empleado para asemejarse a lo anteriormente descrito y para acercarse lo más posible a los generadores de huecos de tensión reales que se utilizan en la industria para estudiar el comportamiento de generadores ante huecos de tensión [11]:

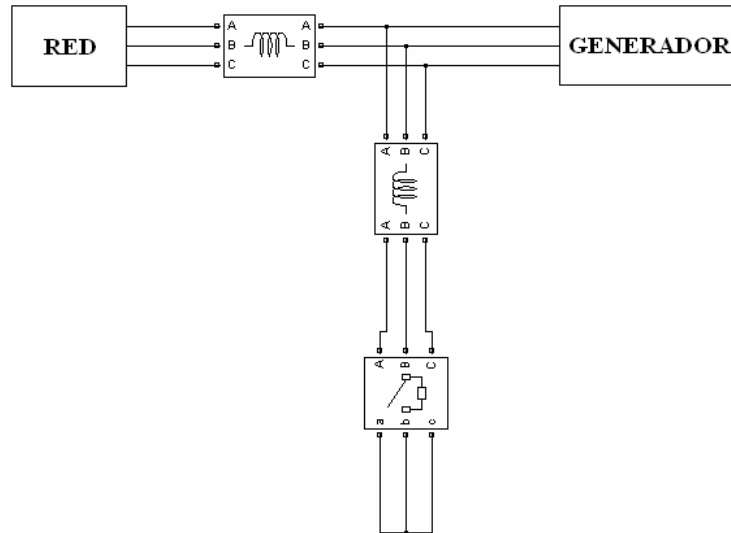


Fig. 2.6. Esquema de un generador de huecos de tensión.

Mediante el ajuste de los valores de las reactancias serie y paralelo (mayor o menor número de reactancias) se puede controlar la profundidad del hueco de tensión aplicado al generador y la duración a través del interruptor de cortocircuito.

La Fig. 2.7 muestra las formas de onda de la tensión obtenidas en la simulación ante un hueco equilibrado de una profundidad del 50 %, tras un ajuste en el que Z_S y Z_F tienen el mismo valor:

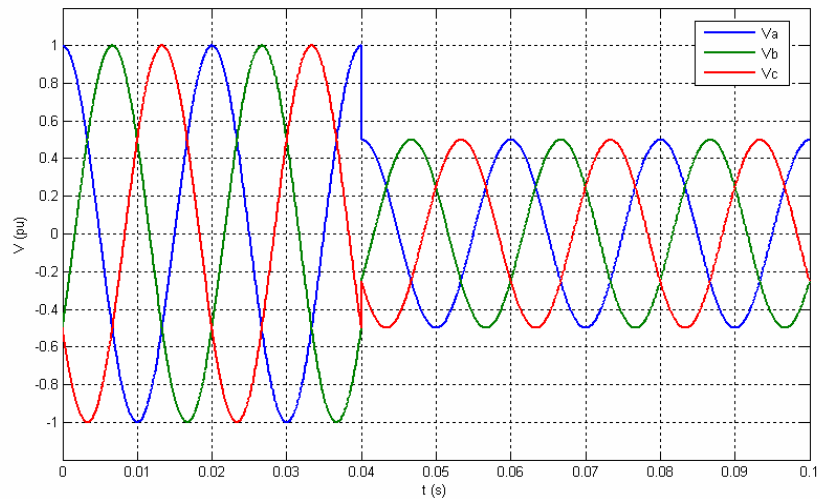


Fig. 2.7. Evolución de las tensiones durante la entrada a un hueco trifásico equilibrado del 50%.

2.3.2 Huecos desequilibrados

En el caso de que se desee estudiar un sistema ante huecos no simétricos, bifásicos o monofásicos, ya no se pueden aplicar los principios del apartado anterior, ya que las corrientes por cada fase serán distintas. Por lo tanto, se pasa de la simpleza de un sistema trifásico que se puede estudiar con un equivalente monofásico a la necesidad de estudiar las tres fases por separado. La alternativa que existe en la literatura es utilizar la teoría de las componentes simétricas [1]. Según esta teoría, presentada por primera vez en 1918 por Charles Legeyt Fortescue, cualquier variable trifásica desequilibrada puede descomponerse como la suma de tres sistemas equilibrados:

- **Componente directa** o de secuencia positiva: es la que existe en los sistemas equilibrados. El orden de las fases es el normal: fase A \rightarrow fase B \rightarrow fase C.

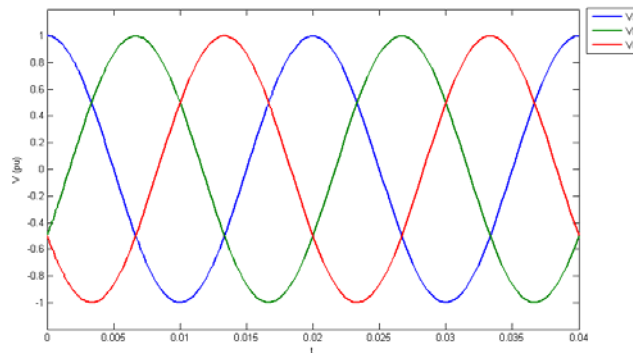


Fig. 2.8. Componente directa.

- **Componente inversa** o de secuencia negativa: se cambia la secuencia de fases: fase A \rightarrow fase C \rightarrow fase B. Si se aplica esta secuencia a un motor, este girará en el sentido contrario al normal.

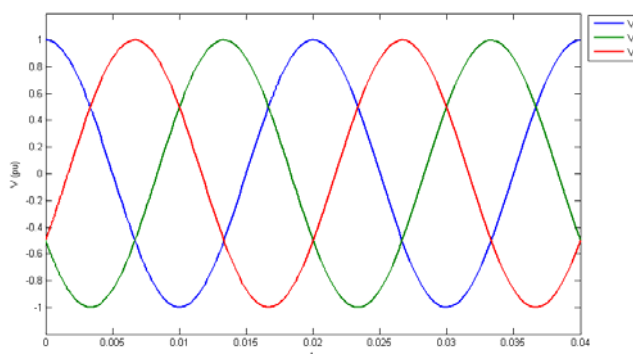


Fig. 2.9. Componente inversa.

- **Componente homopolar** o de secuencia cero: es un sistema donde las tres ondas tienen la misma fase, es decir, las tres fases son en todo momento iguales.

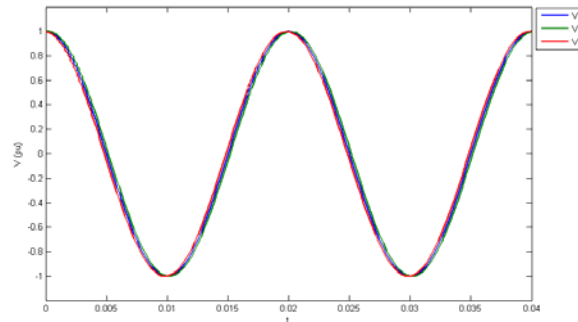


Fig. 2.10. Componente homopolar.

En un sistema trifásico equilibrado sólo aparece la componente directa y las otras dos se hacen nulas. En un sistema donde dos fases estén invertidas sólo aparecerá la componente inversa. En cualquier otro caso el sistema se puede descomponer en las tres secuencias, de manera que el valor de cada fase será la suma del valor que la misma fase tiene en cada una de las tres componentes. Por ejemplo, un motor eléctrico alimentado por un sistema de tensiones desequilibrado puede verse entonces como si estuviese alimentado por tres sistemas distintos de tensión, provocando cada uno de ellos la aparición de su flujo correspondiente. El flujo total de la máquina será la suma de todos ellos.

El análisis de la red eléctrica en presencia de desequilibrios requiere en general el análisis apoyándose en la teoría de las componentes simétricas. En este proyecto no se desarrollará por requerir profundización en un tema distinto del que ocupa, por lo que únicamente se mostrarán los resultados que arroja M. H. J. Bollen [7]:

Cortocircuito monofásico a tierra:

$$V_{PCC,A} = (1 - p)$$

$$V_{PCC,B} = -0.5 - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$V_{PCC,C} = -0.5 + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

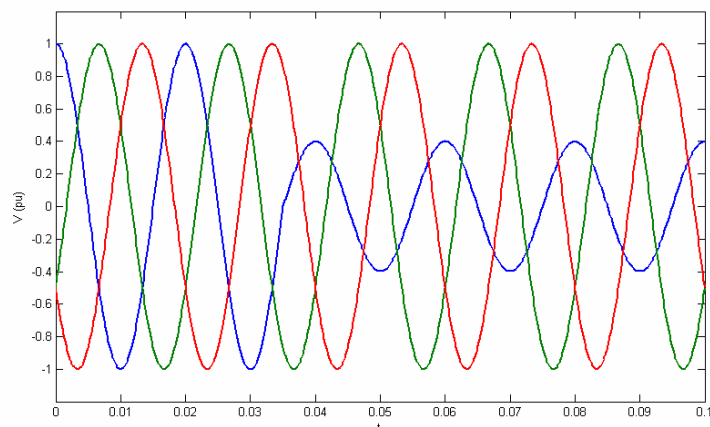


Fig. 2.11. Tensiones simples en hueco monofásico.

Cortocircuito bifásico:

$$V_{PCC,A} = 1$$

$$V_{PCC,B} = -0.5 + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}(p-1)$$

$$V_{PCC,C} = -0.5 + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}(1-p)$$

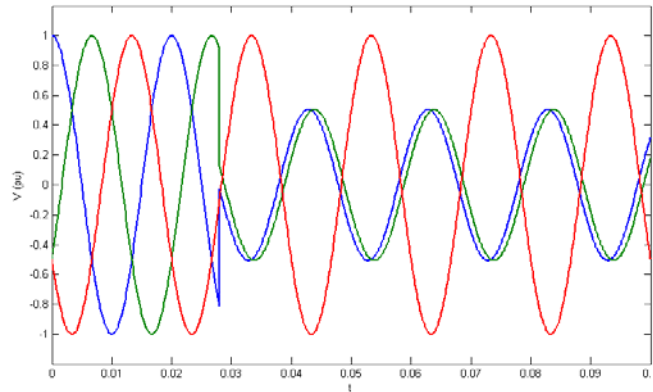


Fig. 2.12. Tensiones simples en hueco bifásico con baja impedancia de falta.

El desfase que resulta de realizar el análisis en las fases B y C en huecos bifásicos viene de que si la impedancia de la falta entre estas fases tiende a cero, las tensiones tenderán a igualarse. Si la impedancia fuera mayor, el desfase también lo sería. Para que quede claro este punto, en la Fig 2.12 se ha simulado una impedancia de falta pequeña, y se observa como tienden a igualarse las tensiones en el momento del cortocircuito. Resolviendo analíticamente los módulos y fases de B y C, el resultado es el mismo.

3. El generador asíncrono. Modelado y control

3.1 Introducción

La máquina asíncrona es el motor industrial por excelencia por sus características, robustez y elevada relación potencia/peso. Esto, junto con la sencilla implementación de su control, hace que constituya la mayoría de la potencia instalada en accionamientos industriales [4].

Como cualquier máquina eléctrica, puede funcionar como generador simplemente buscando el punto de funcionamiento en el cuadrante destinado a ese fin, a velocidad superior a la nominal. Esta aplicación apenas se utiliza en su forma clásica, siendo superada ampliamente por la máquina síncrona. Únicamente en generadores eólicos tiene una presencia importante, constituyendo a día de hoy la mayoría de la potencia instalada en sus dos modalidades: la máquina asíncrona de jaula de ardilla y la máquina asíncrona doblemente alimentada.

La característica que hace idónea a la máquina asíncrona para esta aplicación de generación es su bajo coste y simplicidad de control. Un generador síncrono (también existentes en generación eólica) reclama excitación para la generación de electricidad. Esto se traduce en la necesidad de un convertidor, utilización de elementos de transferencia de energía para magnetizar o el uso de imanes permanentes.

El devanado del estator de la máquina asíncrona está constituido por bobinas alojadas en ranuras decaladas entre sí 120° eléctricos. En cuanto al devanado rotórico existen dos variantes. La más utilizada es el denominado rotor de jaula de ardilla, formado por barras de aluminio unidas entre sí en los extremos por dos aros de cortocircuito, como se muestra en la Fig. 3.1.

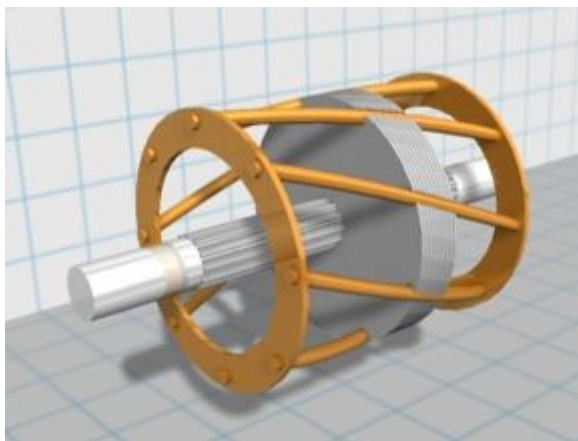


Fig. 3.1. Rotor de jaula de ardilla..

Esta máquina posee una característica mecánica (curva par-velocidad) muy inelástica en su zona de funcionamiento normal. Esto implica que con grandes variaciones de par mecánico, la variación de la velocidad es muy pequeña, por lo que se denominan comúnmente generadores de velocidad fija. Esto presenta problemas dada la extrema variabilidad del viento en un corto espacio de tiempo. Una variación rápida del viento se traduce inmediatamente a través de la turbina en una variación rápida de par. Al mantener prácticamente fija la velocidad, el generador puede llegar a sufrir problemas de fatiga mecánica.

Una segunda variante de máquina asíncrona es aquella con el rotor devanado, en el que se tienen generalmente tres bobinados decalados 120°. La alimentación por los bobinados del rotor constituye la máquina asíncrona doblemente alimentada, mientras que si se cortocircuitan los devanados rotóricos, el generador se comportará exactamente igual que la máquina de jaula.

El principio de funcionamiento del generador asíncrono se basa en crear mediante la alimentación del estator un campo magnético en el entrehierro giratorio a la velocidad de sincronismo. La velocidad de este campo está directamente relacionada con la frecuencia de las corrientes estatóricas y con el número de pares de polos de la máquina, mediante la expresión:

$$(3.1) \quad \Omega_s = \frac{2\pi f_s}{p}$$

Dado que en estas máquinas la velocidad puede ser distinta a la de sincronismo, se define el deslizamiento s como la diferencia entre ambas velocidades, expresada en tanto por uno respecto a la velocidad de sincronismo:

$$(3.2) \quad s = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Una vez que se aplica un par mecánico al eje del generador y que ha llegado a su velocidad de funcionamiento (al ser un generador, su velocidad será superior a la de sincronismo, con un deslizamiento comprendido generalmente entre el 0 y el -10%, lo que se denomina trabajar en supersincronismo) la máquina se encuentra entregando potencia activa P a la red. Pero la creación del flujo del estator requiere el consumo de potencia reactiva Q . Esto implica la necesidad de instalación de bancos de condensadores en la salida eléctrica de generadores de jaula para mantener el factor de potencia de la instalación en el valor deseado.

El problema del consumo de potencia reactiva y, por tanto, de un mal factor de potencia, se soluciona en los generadores eólicos basados en la doble alimentación. En la actualidad en todo el mundo se está generalizando el uso de esta tecnología por la versatilidad que presenta en cuanto a los requerimientos, cada vez más estrictos, de los operadores eléctricos.

Una máquina asíncrona doblemente alimentada es una máquina asíncrona con un rotor bobinado al que se puede acceder desde el exterior a partir de unos anillos rozantes situados en su eje. Así, tanto el estator como el rotor se pueden alimentar de manera independiente, dotando a la máquina de una versatilidad enorme.

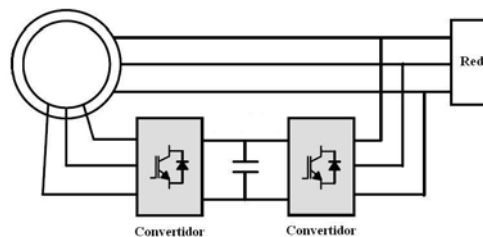


Fig. 3.2. Estructura general de un generador doblemente alimentado.

Como se aprecia en la Fig 3.2, el estator se conecta directamente a la red mientras que por el rotor se inyectan corrientes generadas por un inversor de tensión. La tensión estatórica crea un campo magnético giratorio en el entrehierro, mientras que las corrientes rotóricas generan otro que interactúa con el primero. Controlando de manera efectiva la magnitud y la posición del campo creado por el rotor a partir de las tensiones aplicadas en los anillos rozantes es posible controlar tanto la potencia activa P como la potencia reactiva Q entregada a la red, y por lo tanto el factor de potencia (de ahora en adelante *fdp*).

La gran ventaja de este sistema frente a la solución clásica, que trataba de interponer un sistema AC-DC-AC de electrónica de potencia entre la red y el generador, es que la potencia circulante por el convertidor rotórico, para velocidades en torno a la de sincronismo, es solo una pequeña fracción de la potencia total de la máquina, lo que supone un ahorro importantísimo en los convertidores electrónicos necesarios. De hecho, despreciando las pérdidas en el cobre de los devanados (en torno al 1 – 2% en máquinas de gran potencia), la potencia circulante por el rotor, como se demostrará más adelante, es [2]:

$$(3.3) \quad P_r = -s \cdot P_s$$

es decir, para un deslizamiento del 5 % en régimen supersíncrono la potencia rotórica es en torno al 5 % de la potencia total de la máquina.

En cambio, los generadores basados en máquina asíncrona doblemente alimentada son muy sensibles a las perturbaciones de la red. En el caso que ocupa el presente Proyecto, los huecos de tensión provocarán la aparición de sobrecorrientes en los bobinados del rotor, pudiendo llegar a destruir por completo el convertidor electrónico si no se incluyen elementos de protección o estrategias de control adecuadas. Una de las protecciones clásicas utilizada es la desconexión del convertidor y cortocircuitado de los devanados del rotor de la máquina. El comportamiento en este caso es similar al que sufre la máquina asíncrona de jaula ante un hueco: grandes sobrecorrientes en el estator, que hacen activar las protecciones y producirse la desconexión del aerogenerador de la red. Esto puede verse en los resultados de las simulaciones en el capítulo 5.

En este capítulo se presentan los modelos utilizados para realizar las simulaciones. En primer lugar el modelo dinámico de la máquina asíncrona, generado a partir de las 6 ecuaciones fundamentales. A continuación la máquina doblemente alimentada, que cumple las mismas ecuaciones a excepción de que el valor de la tensión rotórica no es nulo. Por último, para poder fijar un valor de tensión rotórica adecuada a los propósitos buscados se implementa el control vectorial del convertidor rotórico.

3.2 Ecuaciones en régimen dinámico de la máquina asíncrona

A continuación se presentan las ecuaciones de la máquina asíncrona con el fin de poder implementar un modelo de simulación en la herramienta *Matlab Simulink* en el que estudiar el comportamiento del generador ante perturbaciones.

3.2.1 La transformación de Park

Para la obtención de las ecuaciones de la máquina en régimen dinámico, se utilizará el modelo de Park. Este se fundamenta en la sustitución de las 3 fases de la máquina por dos fases equivalentes, consiguiendo una gran simplificación las ecuaciones dinámicas. Estas dos fases equivalentes pueden ser estáticas o giratorias a cualquier velocidad, denominándose α y β si son estáticas o d y q si son giratorias. Esta transformación afecta tanto a las fases del estator como del rotor, que comparten el mismo sistema de referencia (fijo o móvil), por lo que nunca podrán ser fijos o móviles respecto a los dos devanados al mismo tiempo.

Lo más normal en esta transformación es hacer girar los ejes a una velocidad que logre una cierta simplificación de las ecuaciones de la máquina [16]. A lo largo del proyecto se utilizarán los siguientes ejes:

- Ejes α y β fijos con el estator.
- Ejes d y q giratorios a la velocidad de sincronismo con orientación al fasor de tensión. En este caso todas las variables tienen la característica de que son constantes.
- Ejes d y q giratorios a la velocidad de sincronismo, con el eje d orientado al fasor de flujo del estator. En este caso se simplifican muchísimo las ecuaciones necesarias para poder implementar el control de la potencia entregada por la máquina, como se verá en el apartado 3.3, además de que todas las variables son constantes.

La transformación de Park de una variable trifásica a un sistema d - q se consigue aplicando la siguiente transformación:

$$(3.4) \quad \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{bmatrix}$$

donde θ es el ángulo que forman los ejes d - q con la referencia deseada y X puede ser cualquier variable trifásica. La constante K puede tomar cualquier valor, aunque dependiendo del escogido se pueden obtener ciertas simplificaciones. En el caso de este trabajo, se escoge $K = 2/3$, lo que implica que la amplitud de las variables en ejes α y β será la misma que la de las variables originales X_A , X_B y X_C .

Frecuentemente los valores de una variable en ejes α - β y d - q se representan como partes real e imaginaria de un número complejo, gracias a lo que se obtiene toda la información de las tres fases en un solo dato.

3.2.2 Modelo dinámico del generador asíncrono

Para simplificar el sistema, se referirán todas las variables al estator y a un sistema de referencia en ejes d - q giratorio a la velocidad de sincronismo y orientado al fasor de tensión mediante la transformación de Park. Para obtener el ángulo θ del sistema giratorio bastará con integrar la velocidad de sincronismo, esto es [3]:

$$(3.5) \quad \theta = \int \omega_s = \int 2 \cdot \pi \cdot f_s$$

donde f_s es la frecuencia de la tensión de la red, 50 Hz.

La tensión en bornes de la máquina referida al estator es:

$$(3.6) \quad V_s^{\alpha\beta} = R_s \cdot i_s + \frac{d}{dt} \psi_s$$

ecuación que para referir a los ejes d - q giratorios a la velocidad de sincronismo, se debe multiplicar por $e^{-j\theta}$, resultando:

$$(3.7) \quad V_s^{\alpha\beta} \cdot e^{-j\theta} = V_s^{dq} = R_s \cdot i_s + \frac{d}{dt} \psi_s + j \cdot \omega_s \cdot \psi_s$$

donde ω_s es la velocidad de giro del sistema de referencia síncrono. Haciendo lo mismo con la tensión en bornes del rotor, obtendremos:

$$(3.8) \quad V_r^{dq} = R_r \cdot i_r + \frac{d}{dt} \psi_r + j \cdot (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_r$$

donde ω_r representa la velocidad del rotor de la máquina y $(\omega_s - \omega_r)$ la diferencia entre la velocidad del sistema de referencia síncrono y la del rotor. En este caso, el factor para referir a ejes d - q es $e^{-j(\theta-\varepsilon)}$, donde ε es el ángulo que forma el eje del rotor con el eje fijo del estator.

Suponiendo que la máquina trabaje sin saturarse, el flujo del estator será la suma del flujo producido por la corriente circulante por él mismo más una parte del producido por las corrientes del rotor [8]. Lo mismo se cumple con el flujo rotórico. Esto queda reflejado en las siguientes ecuaciones:

$$(3.9) \quad \begin{aligned} \psi_s &= L_s \cdot i_s + L_m \cdot i_r \\ \psi_r &= L_r \cdot i_r + L_m \cdot i_s \end{aligned}$$

donde L_s , L_r y L_m son las inductancias de los bobinados estatórico y rotórico y la inductancia magnetizante.

A partir de esto solo queda definir las ecuaciones que ligan el par mecánico desarrollado por la máquina con las variables y la relación entre el par de carga y el par mecánico [9]:

$$(3.10) \quad T_m = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Im}(i_s \cdot i_r^*)$$

$$(3.11) \quad T_m - T_l = J \cdot \frac{d}{dt} \Omega$$

donde p es el número de pares de polos, L_m es la inductancia magnetizante, J es el momento de inercia del generador y $\Omega = \frac{\omega}{p}$

Con las ecuaciones (3.7) a (3.11) es posible implementar un modelo en *Simulink* en el que se pueda comprobar el funcionamiento dinámico del generador asíncrono. En caso de que se trate de un generador de jaula de ardilla, basta con hacer nula V_r en la ecuación (3.8). Si se trata de un generador doblemente alimentado V_r tomará el valor que el sistema de control imponga.

Con el fin de obtener una lectura de las potencias activa y reactiva consumidas (o generadas, según el signo escogido) de la máquina, la ecuación de la que se obtiene (3.10) es:

$$(3.12) \quad P + j \cdot Q = \frac{3}{2} V_s \cdot I_s^*$$

Una vez obtenido el modelo dinámico, la implementación en *Matlab Simulink* es la siguiente:

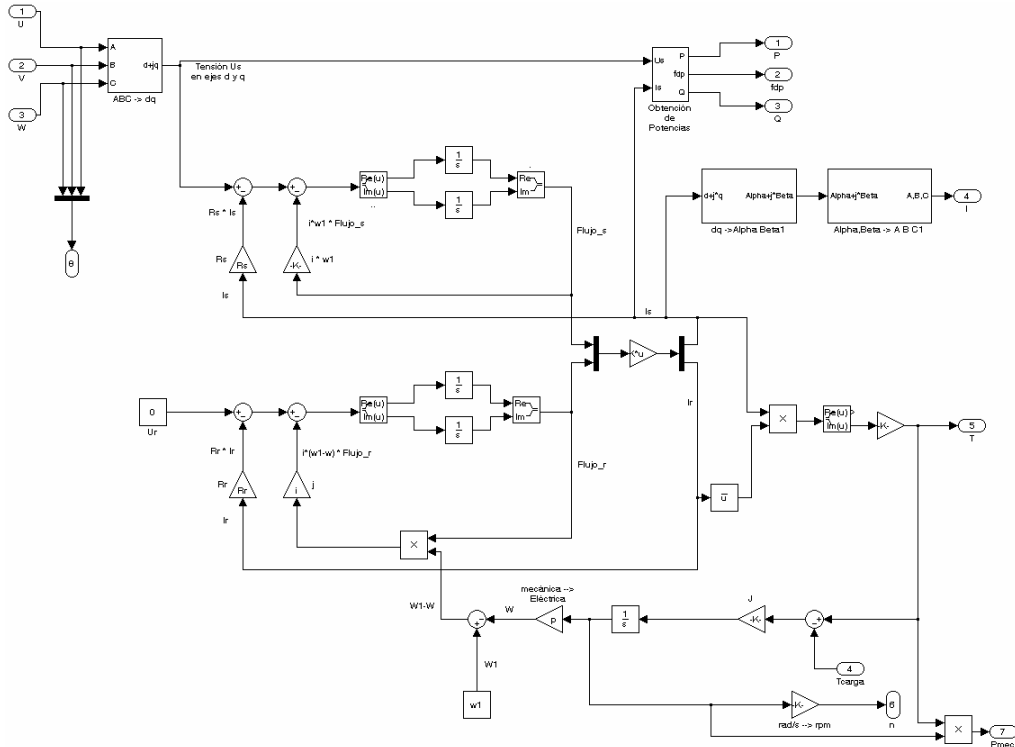


Fig. 3.3. Implementación en Simulink del modelo dinámico del generador asíncrono de jaula.

Agrupando el generador de la Fig 3.3 y añadiendo los subsistemas de alimentación y el generador de huecos de la Fig 2.6 se obtiene el modelo final de generador asíncrono de jaula de ardilla:

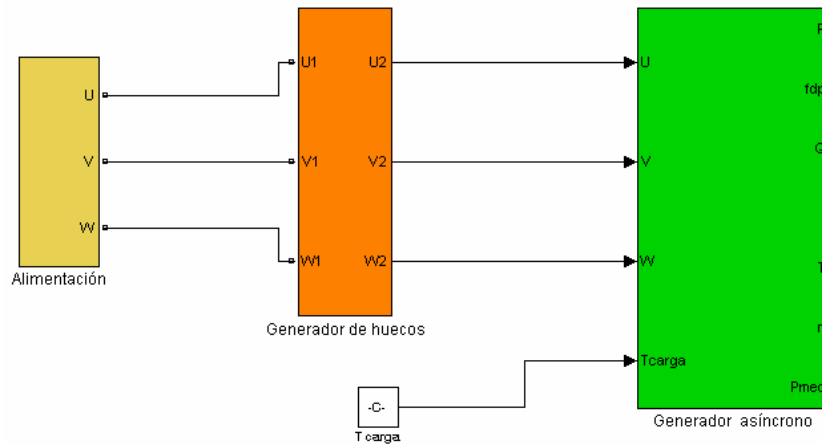
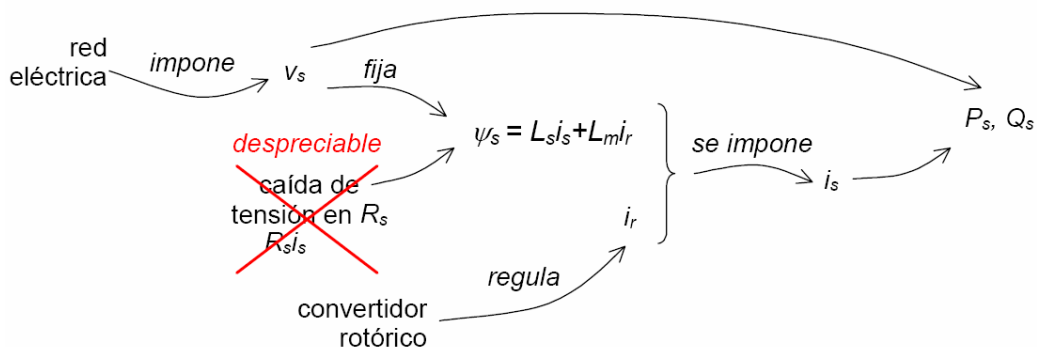


Fig. 3.4. Modelo completo de la simulación del generador asíncrono de jaula.

El control vectorial para la máquina doblemente alimentada que se presentará en el apartado siguiente se basa en la información que aporta la ecuación (3.9): el flujo del estator está formado por la suma ponderada de la corriente de estator y rotor.

En un aerogenerador la tensión del estator está impuesta por la red eléctrica, luego si se desprecia la caída de tensión en la resistencia estatórica R_s , cuyo valor es muy pequeño comparado con el valor de la tensión, el flujo de estator viene determinado por este nivel de tensión, y es independiente del estado interno de la máquina o de la tensión impuesta en el rotor.

El principio de funcionamiento de la doble alimentación consiste en regular las corrientes rotóricas. Al estar el flujo del estator fijado por el nivel de tensión, se consigue controlar de manera indirecta las corrientes del estator y, por tanto, la transferencia tanto de potencia activa como de reactiva a la red.



3.3 Control vectorial del generador asíncrono doblemente alimentado

La principal ventaja del esquema de conversión de energía basado en el generador asíncrono doblemente alimentado es que la potencia que debe ser tratada por los convertidores electrónicos es solo una pequeña parte de la potencia total de la máquina. A continuación se presenta de manera breve una cuantificación de la relación entre ambas potencias.

En régimen permanente las corrientes i_s e i_r son constantes ya que se han referido a un marco de referencia síncrono. Las tensiones en bornes de la máquina en estas condiciones, a partir de (3.7) y (3.8), son:

$$(3.13) \quad \begin{aligned} V_s &= j \cdot \omega_s \cdot \psi_s + R_s \cdot i_s \\ V_r &= j \cdot (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_r + R_r \cdot i_r \end{aligned}$$

Habitualmente, y más justificado en máquinas de gran potencia, las caídas de tensión en las resistencias son suficientemente pequeñas como para poder despreciarlas:

$$(3.14) \quad \begin{aligned} V_s &\approx j \cdot \omega_s \cdot \psi_s \\ V_r &\approx j \cdot (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_r \end{aligned}$$

La potencia que debe ser tratada por el convertidor rotórico es el resultado del producto entre la tensión y la corriente del rotor:

$$(3.15) \quad P_r = V_r \cdot I_r$$

Sustituyendo la tensión por el valor obtenido en (3.14) se tiene:

$$(3.16) \quad P_r = (j \cdot (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_r) \cdot I_r$$

Utilizando el producto vectorial:

$$(3.17) \quad P_r = -(\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_r \times I_r$$

El flujo del rotor puede ser calculado a partir de la ecuación (3.9), y sustituyendo en (3.17):

$$(3.18) \quad P_r = -(\omega_s - \omega_r) \cdot (L_r \cdot I_r + L_m \cdot I_s) \times I_r = -(\omega_s - \omega_r) \cdot L_m \cdot I_s \cdot I_r$$

Procediendo de manera similar para la potencia del estator, se obtiene:

$$(3.19) \quad P_s = \omega_s \cdot L_m \cdot I_s \cdot I_r$$

Las expresiones de las potencias son exactamente iguales a excepción del cambio de signo y la sustitución de las frecuencias de las corrientes. A partir de aquí, la relación entre las potencias resulta inmediata:

$$(3.20) \quad P_r = -\frac{w_s - w_r}{w_s} \cdot P_s = -s \cdot P_s$$

Conviene recordar que la expresión ha sido obtenida despreciando las pérdidas en las resistencias rotórica y estatórica. Con la misma aproximación, la potencia mecánica puede calcularse como la potencia total del generador:

$$(3.21) \quad P_m = P_s + P_r = P_s \cdot (1 - s)$$

Tras realizar un sencillo análisis de las expresiones anteriores se llega a la conclusión de que cuando el generador actúa a velocidades inferiores a la nominal ($s > 0$) la potencia del rotor tendrá signo contrario a la potencia activa y, por tanto, el rotor absorberá energía del convertidor. Cuando el generador actúe a velocidades superiores a la de sincronismo el rotor entregará energía y la potencia global del generador será la generada por el estator más la generada por el rotor.

Como se ha demostrado, por el convertidor del rotor circula únicamente una pequeña proporción de la potencia total de la máquina. Esta depende del deslizamiento al que la máquina esté funcionando. Esta es la razón de que este tipo de generadores sean adecuados para aplicaciones donde el rango de variación de la velocidad sea pequeño, como es el caso de los aerogeneradores.

Como regla general, en el diseño del convertidor se tendrá en cuenta un margen mayor de potencia para poder generar o consumir potencia reactiva (controlar el fdp), hacer frente a transitorios teniendo un adecuado margen de regulación y, como se verá más adelante, hacer frente a huecos de tensión.

3.3.1 Aspectos sobre la orientación de los ejes d - q en el control vectorial

El funcionamiento del control vectorial se basa en trabajar en una referencia síncrona, construida de manera que el eje d esté orientado con el fasor de flujo del estator. En régimen permanente, si se desprecia la caída de tensión en la resistencia estatórica, esto equivale a orientar el eje q con la tensión del estator, ya que el flujo está retrasado 90° respecto a esta. Al despreciar la resistencia estatórica no se comete error importante al ser el circuito casi inductivo puro.

En régimen permanente la orientación según la tensión o el flujo no tiene grandes ventajas o inconvenientes. El problema se presenta en los transitorios de la máquina. Por ejemplo, con cambios bruscos en la amplitud de la tensión de alimentación (caso de los huecos de tensión), el desfase entre la tensión del estator y el flujo ya no tiene por qué ser cercano a 90° . De hecho, se dan cambios en la amplitud y en las velocidades relativas de giro de los dos vectores, por lo que una orientación por tensión durante un transitorio puede llegar a no ser correcta [3]. Esta es la razón de que en el control de la máquina expuesto en este trabajo se utilice una orientación según el vector de flujo, aprovechando su obtención en el modelo del generador.

3.3.2 Bases del control vectorial. Control independiente de P y Q .

Para la realización del control vectorial se ha elegido una orientación de los ejes d - q con el eje d siguiendo el flujo del estator. Puesto que se tiene la máquina ya modelada, es sencillo obtener las componentes del flujo en ejes α - β , y por lo tanto su posición, sin más que calcular $\theta_{fs} = \tan^{-1}\left(\frac{f_{s\beta}}{f_{s\alpha}}\right)$.

Como ya se comentó en el apartado anterior, orientando el eje d según el flujo del estator la tensión queda adelantada 90° , por lo que su componente V_{sd} es nula [3]:

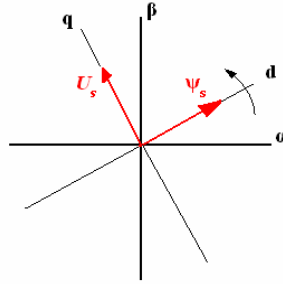


Fig. 3.5. Orientación de los ejes d y q y su consecuencia para la tensión estática.

$$(3.22) \quad \begin{aligned} V_{sd} &= 0 \\ V_{sq} &= V_{red} \approx j \cdot \omega_s \cdot \psi_s \end{aligned}$$

En este caso, como se observa, también se ha despreciado la resistencia estática. Por su parte, y gracias también a la orientación de los ejes, la relación entre las corrientes y los flujos de la ecuación (3.9) es:

$$(3.23) \quad \begin{aligned} i_{sd} \cdot L_s + i_{rd} \cdot L_m &= \psi_{sd} = \psi_s \\ i_{sq} \cdot L_s + i_{rq} \cdot L_m &= \psi_{sq} = 0 \end{aligned}$$

de donde puede obtenerse la relación entre las corrientes de rotor y estator:

$$(3.24) \quad \begin{aligned} i_{sd} &= \frac{\psi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rd} \\ i_{sq} &= -\frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rq} \end{aligned}$$

Haciendo el producto entre estas corrientes y las tensiones de estator dadas por (3.22), según la ecuación (3.12), se obtiene que las potencias activa y reactiva pueden expresarse de manera independiente [12]:

$$(3.25) \quad P_s + j \cdot Q_s = \frac{3}{2} \left[(V_{sd} + j \cdot V_{sq}) \cdot (i_{sd} + j \cdot i_{sq})^* \right]$$

$$(3.26) \quad P_s = \frac{3}{2} V_{sq} \cdot i_{sq} = -V_{red} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rq}$$

$$Q_s = \frac{3}{2} V_{sq} \cdot i_{sd} = V_{red} \cdot \frac{3}{2} \frac{\psi_s}{L_s} - V_{red} \cdot \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rd} = \frac{3}{2} \frac{V_{red}^2}{\omega_s \cdot L_s} - V_{red} \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} \cdot i_{rd}$$

Puede apreciarse que la potencia activa P depende únicamente de i_{rq} , mientras que la potencia reactiva Q solo depende de i_{rd} . Esto permite la utilización de un regulador para cada una de las potencias P y Q que ajuste el valor de la consigna de corriente correspondiente hasta que se alcance el valor ordenado, aunque conociendo el valor de la tensión de la red la utilización de estos reguladores no es estrictamente necesaria. En la herramienta de simulación *Matlab Simulink* se programa como se muestra a continuación:

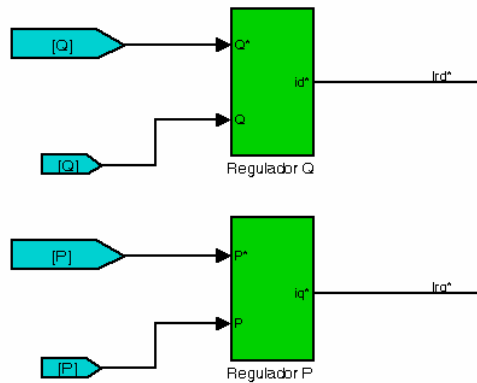


Fig. 3.6. Esquema de Simulink de los reguladores de potencia.

Gracias a las expresiones (3.26) se ha pasado de unas consignas de potencia a unas consignas de corriente que el convertidor rotórico debe imponer.

Como se explicará más adelante este convertidor no impone corriente, sino tensión, por lo que habrá que estudiar la dependencia entre la tensión impuesta al rotor y la corriente resultante de manera que el sistema de control quede completo.

Por otro lado, no debe ocurrir que ante una perturbación o una mala consigna el control rotórico imponga unas corrientes excesivamente elevadas, de manera que puedan producirse daños en la máquina o en el propio convertidor. Esto se soluciona imponiendo en la salida del regulador correspondiente un limitador. La forma en que se aplicará esta limitación de corriente se estudia a continuación.

3.3.3 Limitación de las corrientes de consigna

Como se indicó en el apartado 3.2.1, escogiendo la constante K de la transformación de Park como $K=2/3$, la amplitud de las señales en ejes α y β es igual a la amplitud de las señales en referencias originales X_A , X_B y X_C . A la hora de asignar unas referencias de corriente al convertidor rotórico, la limitación estará normalmente impuesta por la corriente máxima que éste pueda soportar, I_{LIM} .

A continuación se representa un diagrama en ejes α y β en el que aparece la corriente rotórica y el valor máximo del módulo que puede alcanzar, de manera que no se supere I_{LIM} :

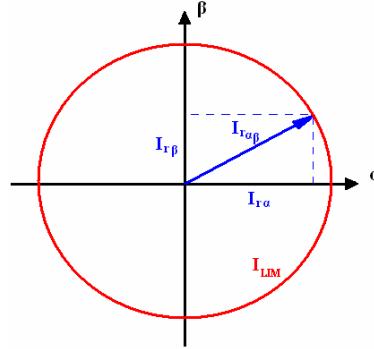


Fig. 3.7. Valores límite de las corrientes de consigna.

Analizando la Fig 3.7 se llega a la conclusión de que se debe limitar el módulo de la corriente, cuyas componentes son I_{ra} e $I_{r\beta}$. No basta con limitar cada una de ellas por separado a I_{LIM} , puesto que se superaría la corriente máxima:

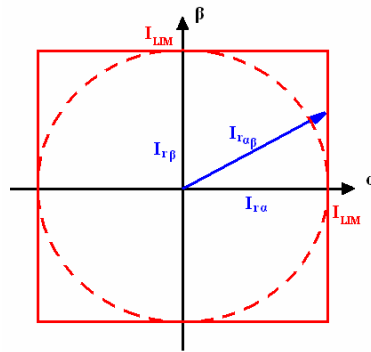


Fig. 3.8. Error al señalar los valores límite de las corrientes de consigna.

Como ejemplo práctico se procede a asignar un límite a cada una de las componentes por separado, tomando $I_{LIM} = 1.35 \text{ pu}$, de manera que se tenga la Fig 3.8. A continuación se impone un escalón en la referencia de manera que las componentes de la corriente rotórica superen I_{LIM} . El resultado es el siguiente:

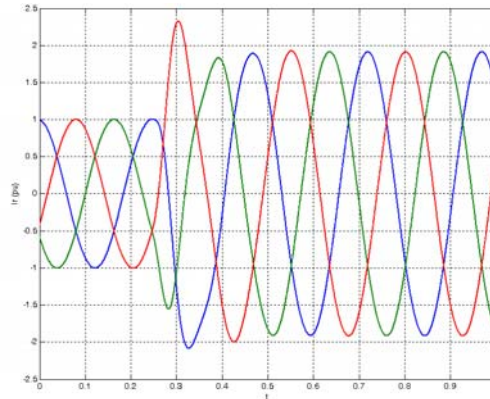


Fig. 3.9. Respuesta de I_r ante una limitación según Fig 3.8.

Como se observa en Fig 3.9 la corriente rotórica ha superado la condición impuesta de que el límite fuera 1.35 pu.

Queda claro que se debe calcular el módulo de la corriente, limitarlo, y devolverlo a forma vectorial (compleja en ejes α y β) manteniendo la fase original. En *Simulink* se implementa de la siguiente manera:

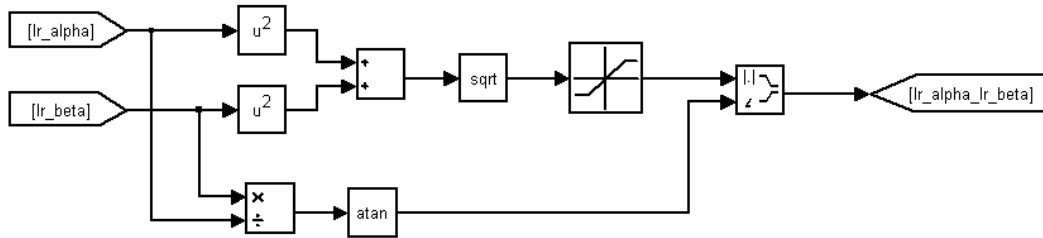


Fig. 3.10. Modelo en Simulink de la limitación propuesta.

El resultado de esta limitación, con las mismas consignas que las aplicadas en Fig 3.9 e $I_{LIM} = 1.35 \text{ pu}$, es el esperado:

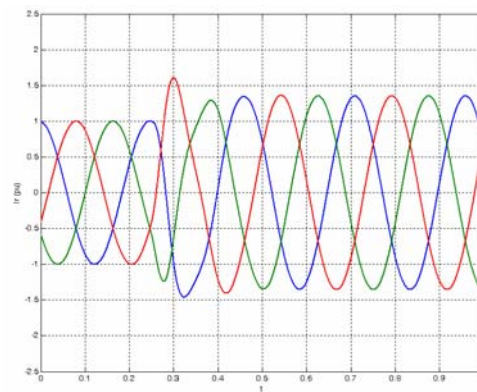


Fig. 3.11. Respuesta de I_r ante una limitación según el módulo.

Con el sistema de limitación propuesto la respuesta del control es la deseada, pero existe un problema con los reguladores. Estos están colocados antes del sistema de limitación y por lo tanto, si se supera en la consigna el límite de corriente, existe diferencia entre ésta y el valor real medido (que solo llega hasta la limitación), lo que provoca que la salida de los reguladores aumente más y más, intentando alcanzar la referencia dada. Para solucionarlo existe un sistema denominado *Anti Windup*, y consiste en combinar la limitación externa propuesta en Fig (3.10) con una limitación de los propios reguladores según Fig (3.8), de manera que la salida de los reguladores se detenga en un valor lo más próximo posible a I_{LIM} .

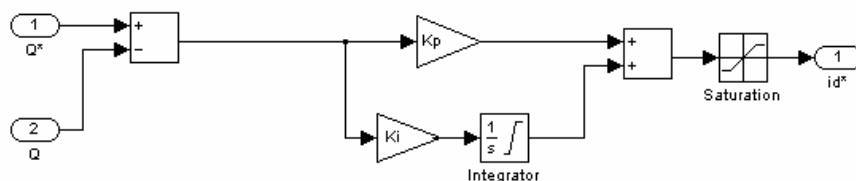


Fig. 3.12. Regulador utilizado para la potencia reactiva, con limitación en el integrador y en la salida, implementando *Anti Windup*.

A continuación se representan dos simulaciones, una sin sistema *Anti Windup* y otra con el sistema aplicado.

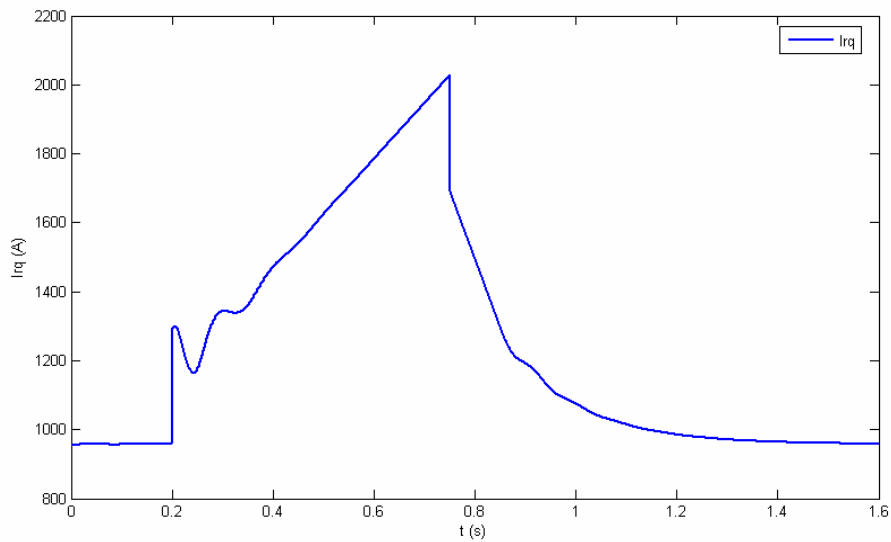


Fig. 3.13. Respuesta del regulador de potencia activa ante un escalón en el que se superaría el límite de corriente, sin sistema *Anti Windup*.

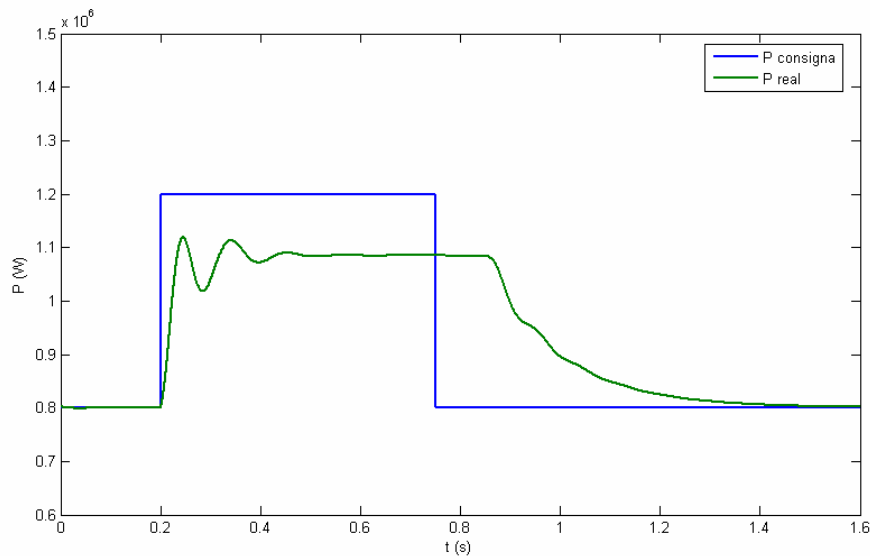


Fig. 3.14. Respuesta del generador ante un escalón en la consigna de potencia activa en el que se superaría el límite de corriente, sin sistema *Anti Windup*.

Como se observa en la figura Fig. 3.14, al alcanzarse el límite de corriente máximo existe una diferencia entre la potencia de consigna y la potencia real del sistema. Esto provoca que la salida del regulador aumente más y más (Fig. 3.13) intentando reducir esta diferencia. Al volver a la consigna de potencia normal, el regulador comienza a reducir la salida, pero esta debe ser continua, y hasta que no alcanza un valor tal que la corriente no esté limitada, no comienza a descender la potencia del generador. Esto se traduce en un retraso en la respuesta, tal y como se observa en la Fig. 3.14.

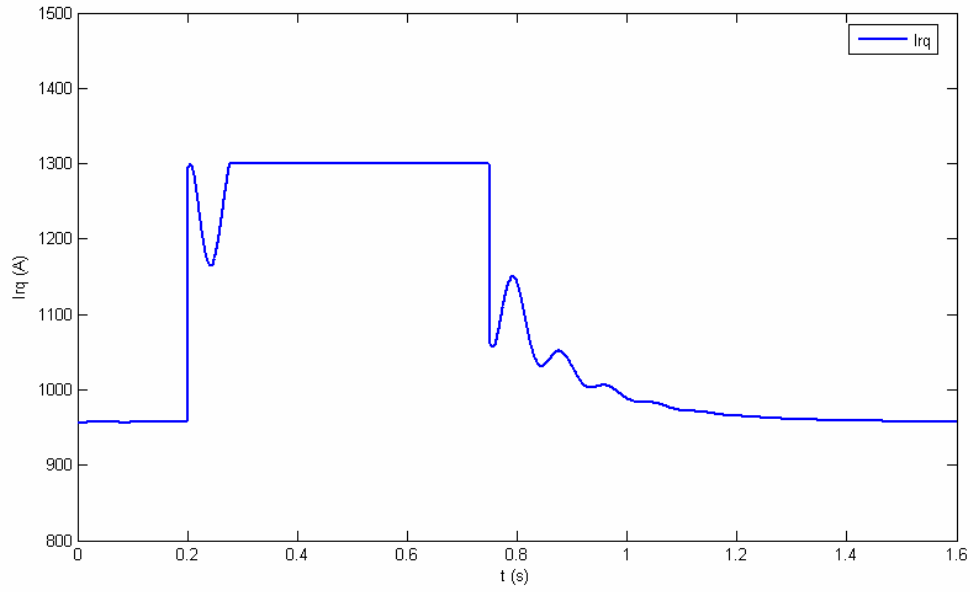


Fig. 3.15. Respuesta del regulador de potencia activa ante un escalón en el que se superaría el límite de corriente, con sistema Anti Windup.

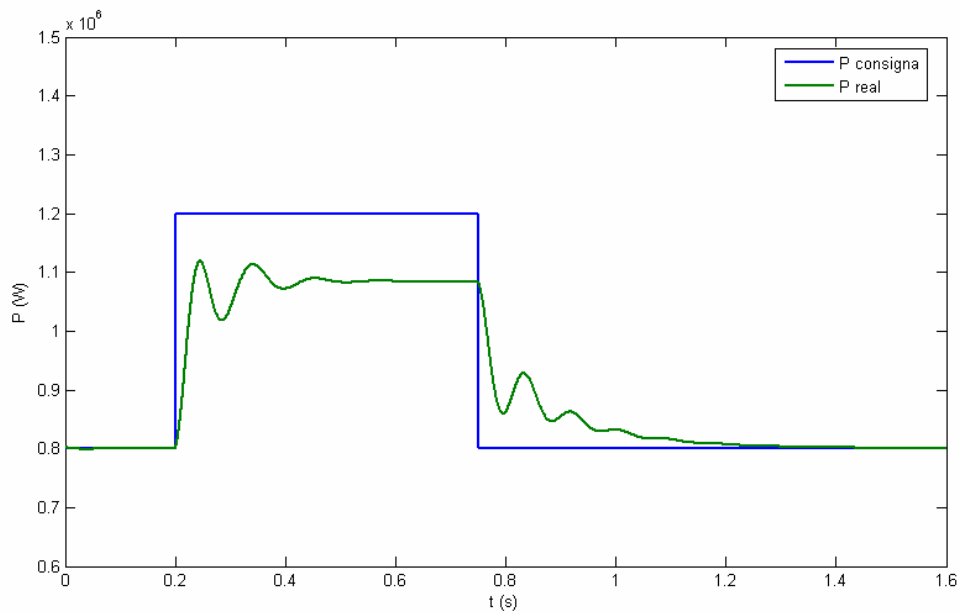


Fig. 3.16. Respuesta del generador ante un escalón en la consigna de potencia activa en el que se superaría el límite de corriente, con sistema Anti Windup.

En caso de implementar el sistema *Anti Windup*, la respuesta del regulador está limitada y por tanto, una vez superada la corriente máxima, ésta deja de aumentar. Esto se traduce en que al recibir orden de reducción de potencia la respuesta es inmediata.

3.3.4 Lazo de corriente

Una vez obtenidas las corrientes de referencia del rotor el convertidor debe encargarse de ajustar una tensión tal que la máquina se comporte como se desea. Este convertidor, por tanto, necesita una serie de lazos de control que obtengan como salida las tensiones necesarias para que las corrientes sigan sus referencias. La manera de trabajar para implementar este control sigue basándose en una orientación en ejes d - q , con el eje d orientado según el fasor de flujo del estator. Por esta razón, una vez que se ha obtenido la tensión a aplicar al rotor de la máquina, esta debe ser referida de nuevo a tensiones en las tres fases mediante la transformada inversa de Park.

Entre la infinidad de reguladores distintos que existen, se escoge el proporcional-integral (PI) por su sencillez y porque resulta suficiente para seguir las consignas de corriente sin errores.

La idea principal se basa en estudiar las ecuaciones que ligán las tensiones y corrientes del rotor dejando que el regulador se encargue de todos aquellos sumandos que dependen directamente de las corrientes e implementando el resto como se muestra a continuación.

La ecuación (3.8) separada en sus dos componentes d y q es [13]:

$$(3.27) \quad \begin{aligned} V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} \\ V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \psi_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} \end{aligned}$$

A la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad del rotor de la máquina $(\omega_s - \omega_r)$ se la denominará de ahora en adelante ω_{slip} .

Por otro lado, los flujos estático y rotórico se obtienen según (3.9):

$$\begin{aligned} \psi_s &= L_s \cdot i_s + L_m \cdot i_r \\ \psi_r &= L_r \cdot i_r + L_m \cdot i_s \end{aligned}$$

Despejando i_s en ambas, igualando y operando, se obtiene la relación entre ψ_s y ψ_r :

$$(3.28) \quad \psi_r = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) \cdot i_r + \psi_s \cdot \frac{L_m}{L_s}$$

que puede fácilmente ser separada en sus dos componentes d y q , recordando que el flujo del estator en eje q es nulo por la orientación utilizada (ecuación 3.23).

Definiendo $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}$ se puede simplificar la ecuación (3.28):

$$(3.29) \quad \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) = \sigma \cdot L_r$$

Introduciendo la ecuación (3.28) en (3.27):

$$(3.30) \quad \begin{aligned} V_{rd} &= R_r \cdot i_{rd} - \omega_{slip} \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{rq} + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{d}{dt} \psi_{sd} \\ V_{rq} &= R_r \cdot i_{rq} + \omega_{slip} \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{rd} + \sigma \cdot L_r \cdot \frac{d}{dt} i_{rq} + \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \cdot \psi_{sd} \end{aligned}$$

En la ecuación de la tensión rotórica en eje d existen dos sumandos que dependen directamente de i_{rd} . Lo mismo ocurre en la segunda ecuación en el eje q . La misión del regulador PI será ajustar la salida para que estos dos sumandos obtengan el valor que deban. El resto de sumandos, a excepción de la derivada del flujo en la primera ecuación que es nula en régimen permanente, se denominan términos de compensación, o términos cruzados, pues dependen cada uno de la corriente obtenida en la otra ecuación.

Una manera de representación de estas ecuaciones, una vez sustituido ψ_{sd} por (3.9), es la siguiente:

$$(3.31) \quad \begin{aligned} V_{rd} &= V'_{rd} - \omega_{slip} \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{rq} \\ V_{rq} &= V'_{rq} + \omega_{slip} \cdot \sigma \cdot L_r \cdot i_{rd} + \omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \cdot (L_s \cdot i_{sd} + L_m \cdot i_{rd}) \end{aligned}$$

En ella se han agrupado los términos, de manera que V'_{rd} y V'_{rq} representan las salidas de los reguladores PI (todo aquello que depende directamente de la corriente rotórica correspondiente). La Fig 3.17 muestra el diagrama de bloques utilizado en la implementación de la ecuación (3.31) en *Simulink*:

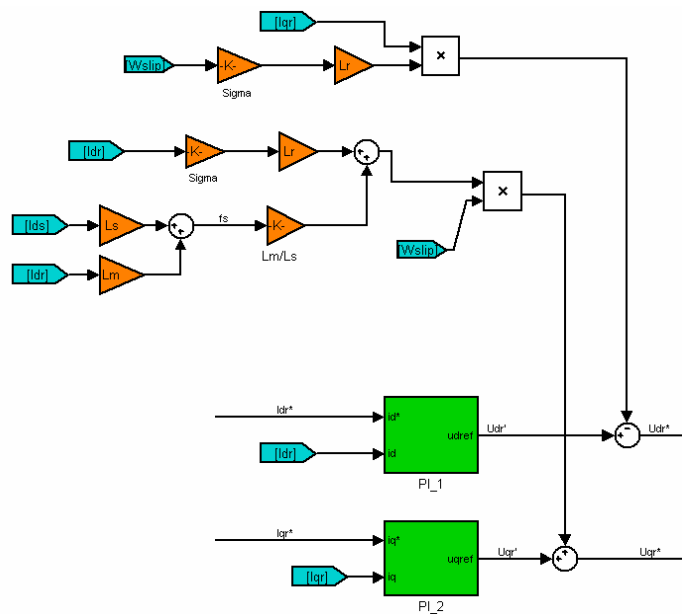


Fig. 3.17. Diagrama de bloques del lazo de corriente.

Los términos cruzados aparecen debido a que los ejes en los que el control está implementado no son solidarios con las bobinas físicas del rotor, sino que giran respecto de él a una velocidad ω_r , diferencia entre la velocidad del rotor y la velocidad de sincronismo de las corrientes estáticas. En régimen permanente estos términos son constantes y no afectan demasiado al funcionamiento de los reguladores PI, pero son estimados y compensados por el control para reducir de manera notable su efecto durante los transitorios. Además, al incluirlos, el lazo de control se simplifica notablemente, llegando a obtener una planta lineal que ayudará en el diseño de los reguladores.

Diseño de los reguladores

Para obtener el valor de las constantes de los reguladores se modelará el generador como un sistema de primer orden, con función de transferencia

$$(3.32) \quad R(s) = \frac{K}{1 + s \cdot T}$$

donde $K = 1/R_r$ y $T = \frac{\sigma \cdot L_r}{R_r}$, valores que se obtienen de las ecuaciones (3.30) y (3.31).

Una vez identificada la función de transferencia del generador, el sistema debe responder al siguiente diagrama de bloques:

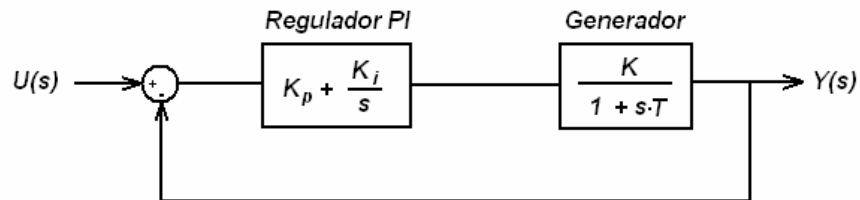


Fig. 3.18. Diagrama de bloques del lazo de corriente.

El diseño se realizará de tal forma que los polos de lazo cerrado sean complejos conjugados con un amortiguamiento y una pulsación natural deseados. Para que el sistema sea estable la parte real de los polos debe ser negativa, y la constante de tiempo del regulador debe ser más pequeña que la del generador.

La función de transferencia en lazo cerrado del sistema es:

$$(3.33) \quad \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{R(s)}{1 + R(s) \cdot P(s)}$$

donde $P(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$ es la función de transferencia del regulador PI.

Operando e igualando a una función de transferencia genérica de segundo orden se pueden identificar los parámetros del regulador [3]:

$$\begin{aligned}\frac{Y(s)}{U(s)} &= \frac{R(s)}{1 + R(s) \cdot P(s)} = \frac{\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \frac{K}{1 + s \cdot T}}{1 + \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \cdot \frac{K}{1 + s \cdot T}} = \\ &= \frac{(K_p s + K_i) \cdot \frac{K}{T}}{s^2 + \left(\frac{1 + K_p K}{T}\right)s + \frac{K_i K}{T}} = \frac{(K_p s + K_i) \cdot \frac{K}{T}}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \\ \frac{K_p}{T} &= 2\zeta\omega_n \Rightarrow K_p = 2\zeta\omega_n T \\ \omega_n^2 &= \frac{K_i}{T} \Rightarrow K_i = \omega_n^2 T\end{aligned}$$

Como se ha indicado, debe cumplirse para obtener estabilidad que la constante de tiempo del regulador sea menor que la del generador. Con esto se conseguirá que el regulador siempre tenga una respuesta más rápida que la que pueda tener el generador, ajustándose a él en cambios que puedan producirse en los valores de referencia. Esto se traduce en que debe cumplirse

$$(3.34) \quad \frac{K_p}{K_i} < \frac{\sigma \cdot L_r}{R_r}$$

3.3.4 Sistema de control completo

En los apartados anteriores se ha mostrado cada una de las partes que componen el sistema de control del generador asíncrono doblemente alimentado:

- Cálculo de consignas: obtención de las corrientes rotóricas de referencia a partir de las consignas de potencia.
- Limitación de las consignas de corriente para evitar problemas en el convertidor.
- Lazos de corriente: obtención de la tensión a aplicar a los devanados rotóricos para conseguir que la corriente iguale a la de consigna.
- Transformaciones de Park necesarias: orientación de los ejes a sistemas de referencia síncronos adecuados para los propósitos buscados.

A continuación se presenta el modelo del generador implementado en Matlab Simulink (Fig 3.19), el esquema seguido en el desarrollo del control vectorial (Fig 3.20), y el propio control vectorial implementado (Fig 3.21).

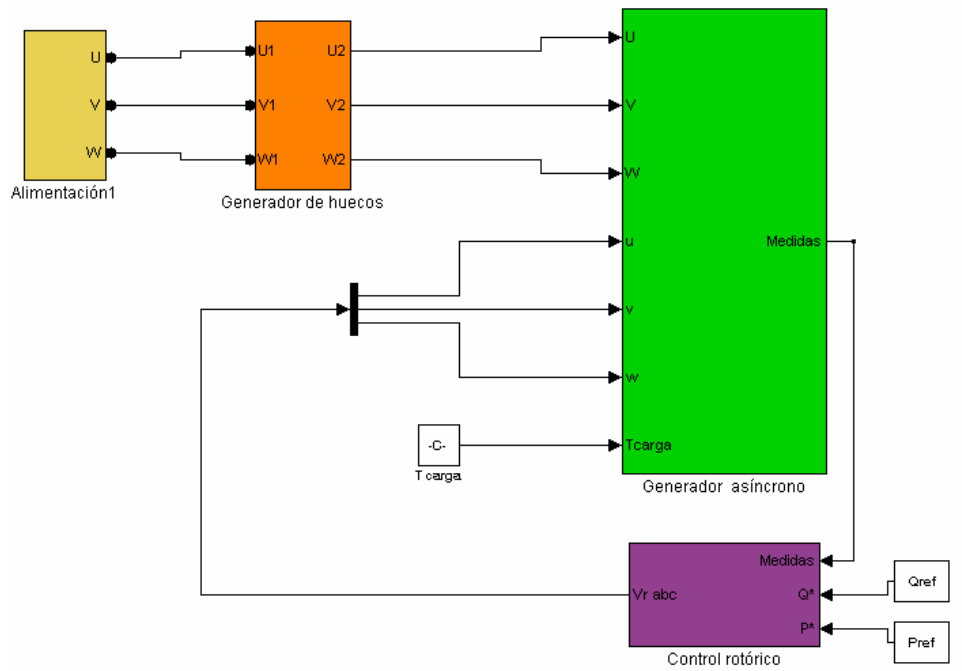


Fig. 3.19. Modelo en Simulink del generador asíncrono doblemente alimentado.

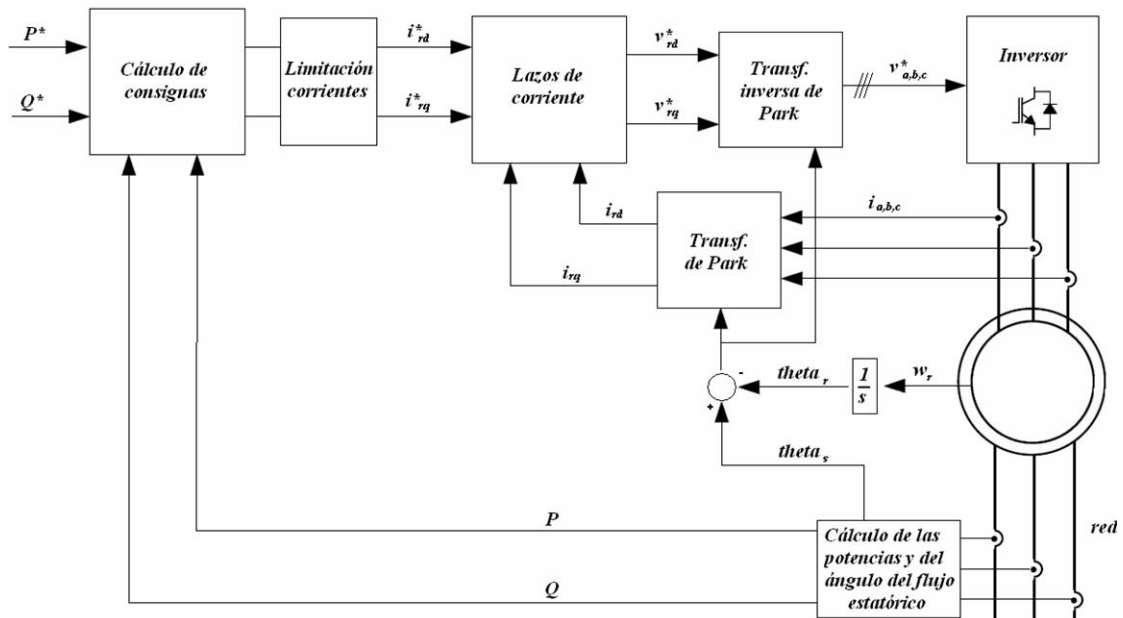


Fig. 3.20. Esquema utilizado en la implementación del control de la máquina doblemente alimentada.

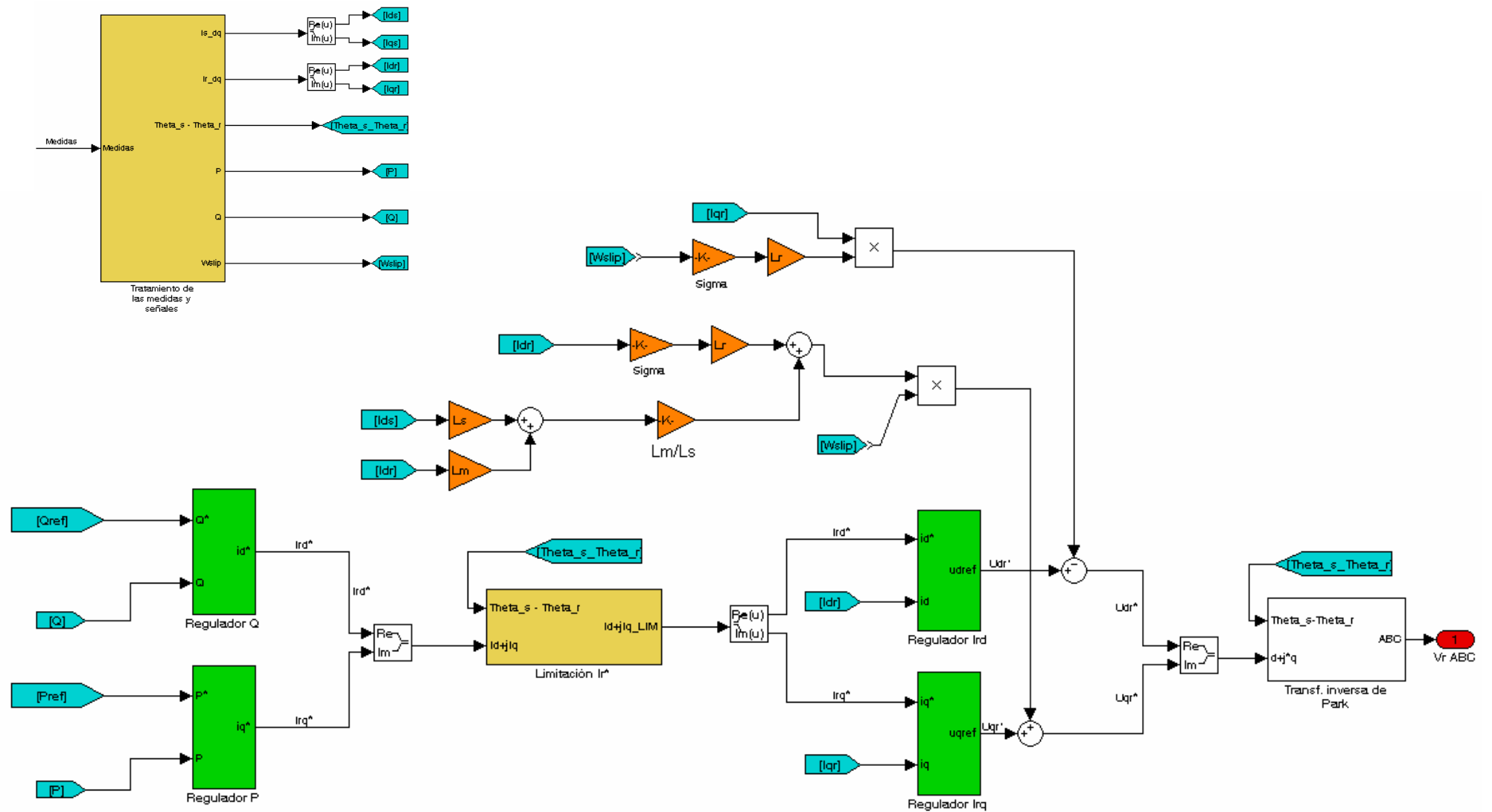


Fig. 3.21. Diagrama del sistema de control completo.

4. Inicialización y validación de los modelos de simulación

4.1 Introducción

Una vez que se han generado los modelos dinámicos y han sido implementados en *Matlab Simulink*, el siguiente paso consiste en comprobar que responden fielmente a la realidad validando los modelos a través de los valores nominales ofrecidos por el fabricante, mediante el método propuesto en [11].

Para el caso del generador asíncrono de jaula de ardilla la resolución del circuito equivalente ayudará a encontrar el par de carga necesario para funcionar en condiciones nominales y posteriormente se comprobará que alimentándolo con la tensión nominal y el par obtenido, tanto las potencias, corrientes y la velocidad serán las dadas por la hoja de características, además de la corriente de vacío.

En el caso del generador asíncrono doblemente alimentado, se resolverá el circuito equivalente conociendo la potencia y el factor de potencia que debe entregar a la red en condiciones de plena carga, buscando obtener la tensión y corriente rotórica necesarias para ello. Estos datos deberán coincidir con el resultado de la simulación, así como las potencias activa y reactiva.

Para cada una de las máquinas se desarrollará un código para realizar la inicialización al punto de funcionamiento deseado, con el fin de no obtener transitorios en el comienzo de la simulación.

4.2 Generador asíncrono de jaula

El generador seleccionado para la simulación es una máquina de la marca austriaca Elin, instalada en aerogeneradores NM 48. Sus características son:

- **Marca:** Elin
- **Descripción:** generador asíncrono de jaula de ardilla
- **Tensión nominal:** 690 V
- **Potencia nominal:** 750 kW
- **Potencia aparente:** 843 kVA
- **Potencia reactiva a plena carga:** 385 kVAr
- **Número de polos:** 4
- **Velocidad de sincronismo:** 1500 rpm
- **Velocidad a plena carga:** 1510 rpm
- **Momento de inercia:** 24 Kgm²

Los parámetros del circuito equivalente conectado en estrella son:

- **Resistencia del estator:** $R_s = 0.0045 \text{ Ohm}$
- **Reactancia del estator:** $X_s = 0.0513 \text{ Ohm}$
- **Resistencia del rotor, referida al estator:** $R'_r = 0.004 \text{ Ohm}$
- **Reactancia del rotor, referida al estator:** $X'_r = 0.066 \text{ Ohm}$
- **Reactancia de magnetización:** $X_m = 2.2633 \text{ Ohm}$

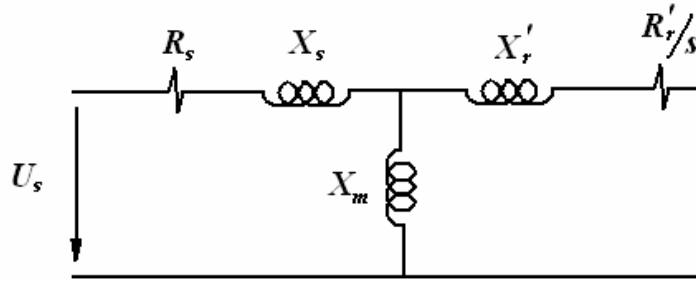


Fig. 4.1. Circuito equivalente del generador asíncrono de jaula de ardilla.

Para obtener el par de carga que se debe aplicar al generador para que funcione a plena carga, se resuelve el circuito equivalente. Las ecuaciones del sistema son:

$$(4.1) \quad U_s = I_s \cdot (R_s + j \cdot X_s + j \cdot X_m) + I_r \cdot j \cdot X_m$$

$$(4.2) \quad U_r = 0 = I_s \cdot j \cdot X_m + I_r \cdot \left(\frac{R'_r}{s} + j \cdot X'_r + j \cdot X_m \right)$$

Expresándolo de forma matricial:

$$(4.3) \quad \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j \cdot (X_s + X_m) & j \cdot X_m \\ j \cdot X_m & \frac{R'_r}{s} + j \cdot (X'_r + X_m) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix}$$

de donde se puede obtener el valor de las corrientes:

$$(4.4) \quad \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} = \text{Inv}[Z] \cdot \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix}$$

donde Z es la matriz de impedancias de (4.3). A partir del resultado de (4.4), la ecuación de obtención del par es:

$$(4.5) \quad T = 3 \cdot p \cdot L_m \cdot \text{Im}(I_s \cdot \bar{I}_r)$$

donde L_m es la inductancia de magnetización.

Con lo anterior, se ha obtenido el par de plena carga del generador. Gracias a la resolución del circuito equivalente, también es posible calcular el valor del flujo en el entrehierro en régimen permanente, lo que es necesario para poder inicializar la simulación. Para esto se utiliza un programa de *Matlab* que se ejecuta antes de comenzar a simular:

%% OBTENCIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES %%

% Parámetros del generador:

Rs=0.0045; %Ohm
Rr=0.004; %Ohm
Xs=0.0513; %Ohm
Xr=0.066; %Ohm
Xu=2.2633; %Ohm

Xsm=Xs+Xu;
Xrm=Xr+Xu;

Ls=Xsm/w1;
Lm=Xu/w1;
Lr=Xrm/w1;

N1 = 1500; %rpm
Nn = 1510; %rpm
s=(N1-Nn)/N1;

% Resolución del circuito equivalente

ue=690/sqrt(3);

Z=[Rs+i*Xsm Xu*i; Xu*i (Rr/s)+i*Xrm];
U=[ue 0];
I=inv(Z)*U';

% Cálculo del par

T=p*3*Lm*imag(I(1)*conj(I(2)))

% Cálculo del flujo

is=3/2*sqrt(2)*I(1);
ir=3/2*sqrt(2)*I(2);

fs=Ls*is+Lm*ir;
fr=Lm*is+Lr*ir;

% Condiciones iniciales del generador:

w_inic = Nn*2*pi/60;

fsd_inic = real(fs);
fsq_inic = imag(fs);

frd_inic = real(fr);
frq_inic = imag(fr);

Una vez inicializada la simulación, está en disposición de ejecutarse con los valores nominales de tensión y par. El resultado es el esperado:

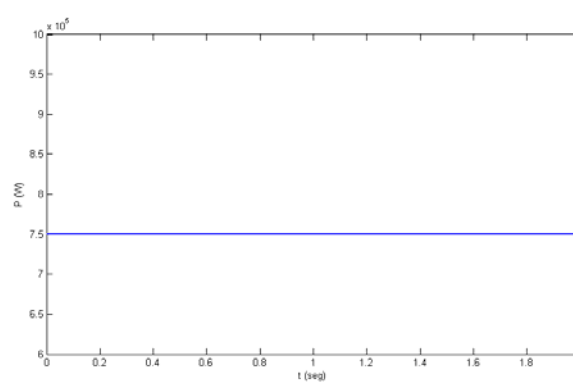


Fig. 4.2. Potencia activa tras la inicialización y con alimentación nominal.

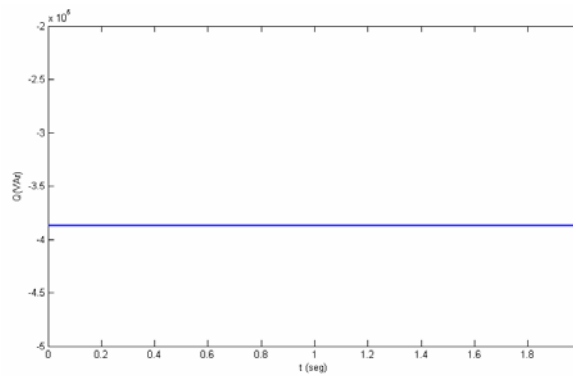


Fig. 4.3. Potencia reactiva tras la inicialización y con alimentación nominal.

Para validar el modelo, se comparan los valores nominales y de vacío de la hoja de características del generador con los obtenidos:

| Parámetro | Hoja de características | Resultados de la simulación | Validación |
|----------------------|-------------------------|-----------------------------|------------|
| n | 1510 rpm | 1510.57 rpm | OK |
| P | 750 Kw | 749.887 kW | OK |
| Q | -385 KVAr | -386.955 kVAr | OK |
| I | 705 A | 706.05 A | OK |
| fdp | 0.8896 | 0.8887 | OK |
| I₀ | 188 A | 170.6 A | OK |

Tabla 4.1. Validación de los resultados de la simulación para el generador asíncrono de jaula.

4.3 Generador asíncrono doblemente alimentado

El generador modelado es un Indar NCR-450-L/4, utilizado en los aerogeneradores G52 de Gamesa Eólica, con conexión rotórica por anillos rozantes.



Fig. 4.5. Vista del generador doblemente alimentado Indar NCR-450-L/4.

Las características son las siguientes:

- **Marca:** Indar
- **Descripción:** generador asíncrono doblemente alimentado
- **Tensión nominal:** 690 V
- **Potencia nominal:** 800 kW
- **Factor de potencia:** 1
- **Potencia reactiva a plena carga:** 0 kVAr
- **Número de polos:** 4
- **Velocidad de sincronismo:** 1500 rpm
- **Velocidad a plena carga:** 1620 rpm
- **Tensión a rotor bloqueado:** 1852 V
- **Momento de inercia:** 65 Kgm²

Los parámetros del circuito equivalente conectado en estrella son:

- **Resistencia del estator:** $R_s = 0.016 \text{ Ohm}$
- **Reactancia del estator:** $X_s = 0.074 \text{ Ohm}$
- **Resistencia del rotor, referida al estator:** $R'_r = 0.0125 \text{ Ohm}$
- **Reactancia del rotor, referida al estator:** $X'_r = 0.121 \text{ Ohm}$
- **Reactancia de magnetización:** $X_m = 6.78 \text{ Ohm}$
- **Resistencia de magnetización:** $R_m = 215 \text{ Ohm}$

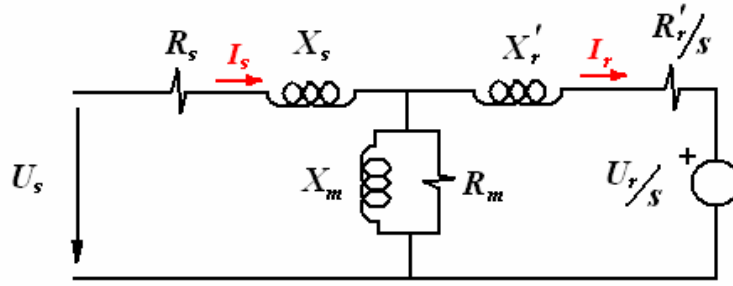


Fig. 4.6. Circuito equivalente del generador asíncrono doblemente alimentado.

Para poder inicializar la simulación es necesario conocer la tensión rotórica a imponer para trabajar en condiciones nominales ($P = 800 \text{ Kw}$ y $f_{dp} = 1$). Para obtenerla, se resolverá el circuito equivalente. Las ecuaciones del sistema de la Fig 4.6 son:

$$(4.6) \quad U_s = I_s \cdot (Z_s + Z_m) - I_r \cdot Z_m$$

$$(4.7) \quad \frac{U_r}{s} = I_s \cdot Z_m - I_r \cdot (Z_r + Z_m)$$

donde

$$Z_s = R_s + j \cdot X_s$$

$$Z_r = \frac{R_r'}{s} + j \cdot X_r'$$

$$Z_m = \frac{j \cdot X_m \cdot R_m}{R_m + j \cdot X_m}$$

Despejando I_s de la ecuación del rotor (4.7) e introduciéndola en la del estator (4.6) se obtienen dos ecuaciones que pueden expresarse de manera matricial:

$$(4.8) \quad I_s = \frac{\frac{U_r}{s} + I_r \cdot (Z_r + Z_m)}{Z_m}$$

$$(4.9) \quad U_s = \frac{Z_s + Z_m}{Z_m} \cdot \left(\frac{U_r}{s} + I_r \cdot (Z_r + Z_m) \right) - I_r \cdot Z_m$$

$$(4.10) \quad \begin{bmatrix} U_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_s + Z_m}{s \cdot Z_m} & \frac{Z_s + Z_m}{Z_m} \cdot (Z_r + Z_m) - Z_m \\ \frac{1}{s \cdot Z_m} & \frac{Z_r + Z_m}{Z_m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

La máquina en cuestión trabaja con $f_{dp} = 1$ y potencia activa $P = 800 \text{ Kw}$, por lo que puede obtenerse la corriente estatórica que absorberá en régimen permanente:

$$I_s = \frac{800 \cdot 10^3}{3 \cdot 690 / \sqrt{3}} = 669,39 \text{ A}$$

Resolviendo el sistema (4.10), el resultado es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} U_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -24,8259 - j \cdot 11,2830 \\ -678,6 + j \cdot 60,1 \end{bmatrix}$$

Aplicando esta tensión al rotor la máquina trabajará en las condiciones nominales de la hoja de características, y se está en disposición de inicializar la simulación. Para ello se utiliza el siguiente código:

%% OBTENCIÓN DE LAS CONDICIONES INICIALES %%

% Parámetros del generador

```
Rs=0.016; %Ohm
Rr=0.0125; %Ohm
Xs=0.074; %Ohm
Xr=0.121; %Ohm
Xu=6.78; %Ohm
```

```
Xsm=Xs+Xu;
Xrm=Xr+Xu;
```

```
Ls=Xsm/w1;
Lm=Xu/w1;
Lr=Xrm/w1;
```

```
N1 = 1500; %rpm
Nn = 1620; %rpm
s=(N1-Nn)/N1;
```

% Resolución del circuito equivalente

```
ue=690/sqrt(3);
ur=-24.8259 -11.2830i;
```

```
Z=[Rs+i*Xsm -Xu*i;Xu*i*s -((Rr/s)+i*Xrm)*s];
U=[ue;ur];
I=inv(Z)*U ;
```

% Cálculo del par:

```
T=p*3*Lm*imag(I(1)*conj(I(2)));
```

% Cálculo del flujo:

```
is=3/2*sqrt(2)*I(1);  
ir=-3/2*sqrt(2)*I(2);
```

```
fs=Ls*is+Lm*ir;  
fr=Lm*is+Lr*ir;
```

% Condiciones iniciales de la simulación:

```
w_inic = Nn*2*pi/60;
```

```
fsd_inic = real(fs);  
fsq_inic = imag(fs);  
frd_inic = real(fr);  
frq_inic = imag(fr) ;
```

Tras alimentar el generador con tensión y par nominales, el resultado de la inicialización es el siguiente:

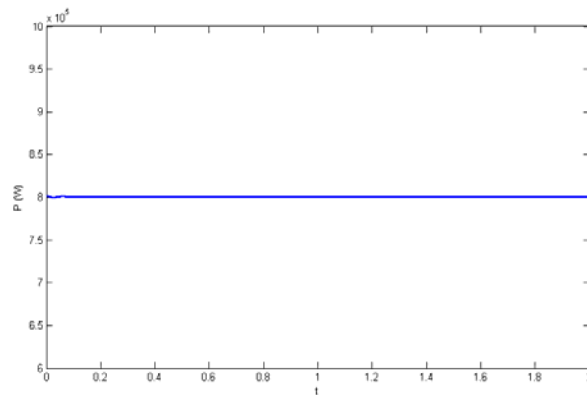


Fig. 4.7. Potencia activa tras la inicialización del generador doblemente alimentado.

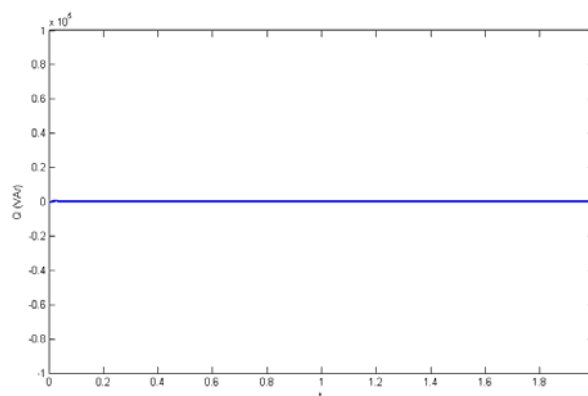


Fig. 4.8. Potencia reactiva tras la inicialización del generador doblemente alimentado.

Tal y como se ha hecho con la máquina asíncrona de jaula, la validación consistirá en comparar los valores nominales y de vacío de la hoja de características con los resultados de la simulación:

| Parámetro | Hoja de características | Resultado de la simulación | Validación |
|-----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| n | 1620 | 1619,99 | OK |
| P | 800 Kw | 800 kW | OK |
| Q | 0 KVA _r | 0 kVA _r | OK |
| I | 669 A | 669,33 A | OK |
| f_{dp} | 1 | 1 | OK |
| I_o | 216 A | 218.1 A | OK |

Tabla 4.2. Validación de los resultados de la simulación para el generador asíncrono doblemente alimentado.

5. Resultados

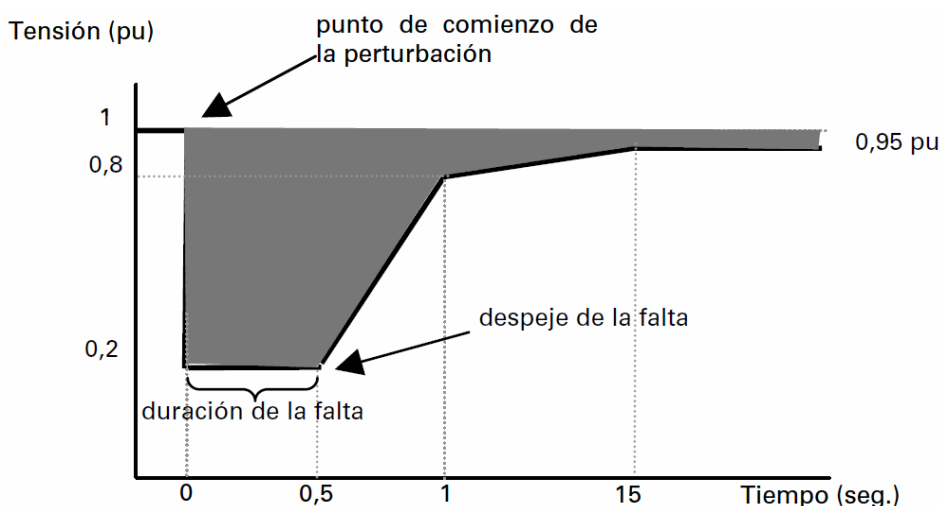
5.1 Introducción

En este capítulo se mostrarán los resultados arrojados por las simulaciones de los dos generadores ante huecos de tensión, tanto simétricos como asimétricos. Para poder describir los problemas que aparecen durante estas perturbaciones en la tensión se realizarán un total de 5 huecos trifásicos y 3 bifásicos a cada una de las máquinas, con la tensión residual indicada en la siguiente tabla:

| Hueco nº | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Hueco trifásico | 90% | 70% | 50% | 30% | 15% |
| Hueco bifásico | 90% | 70% | 50% | -- | -- |

Tabla 5.1. Huecos a aplicar a cada una de las máquinas en estudio, con valores de tensión de fase residual durante el hueco.

La duración de los huecos de tensión se ha escogido de 500 ms por ser la duración del hueco que Red Eléctrica de España exige a los laboratorios de ensayo para realizar los tests en aerogeneradores según el *Procedimiento de Operación PO 12.3*.



Curva tensión-tiempo que define el área del hueco de tensión en el punto de conexión a red que debe ser soportado por la instalación. Tensión fase-tierra correspondiente a las fases en falta.

Fuente: PO 12.3, Red Eléctrica de España, [20]

Para cada una de las máquinas el valor de las protecciones está tarado en:

| Máquina | Sobrecorriente | Sobrevelocidad | Sobrecorriente en rotor |
|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------|
| Jaula | 2 pu | 4,3% sobre nominal | -- |
| Doblemente alimentada | 2 pu | 5% sobre nominal | 2 pu |

Tabla 5.2. Tarado de las protecciones de cada una de las máquinas en estudio

En el caso de la máquina doblemente alimentada la corriente de consigna del convertidor rotórico está limitada a 1.5 pu. Esto puede ocasionar que en caso de necesitar una corriente mayor para mantener la potencia en el valor de consigna, ésta no se alcance y se detenga el control por debajo de la referencia.

A continuación se muestran, para cada hueco aplicado, las gráficas de cada una de las variables y un breve comentario evaluando la posibilidad de desconexión del generador de la red según las protecciones indicadas en la tabla 5.2. Una vez mostrados los resultados se hará una breve valoración de estos, comparando la respuesta obtenida con resultados de ensayos reales en aerogeneradores.

5.2 Generador asíncrono de jaula:

Hueco simétrico, tensión residual 90%, duración 500 ms

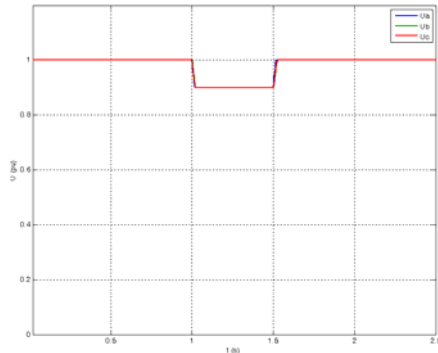


Fig 5.1. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

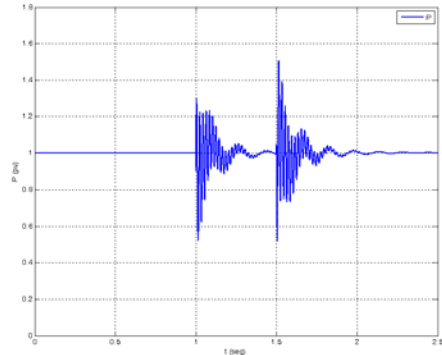


Fig 5.5. Potencia activa del generador durante el ensayo

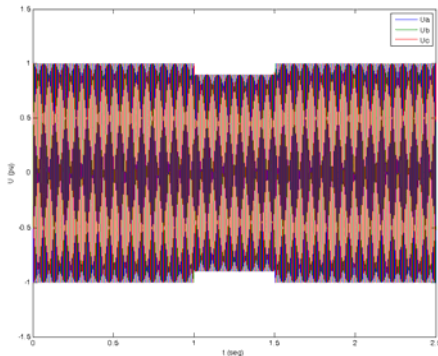


Fig 5.2. Evolución de la tensión trifásica durante el ensayo

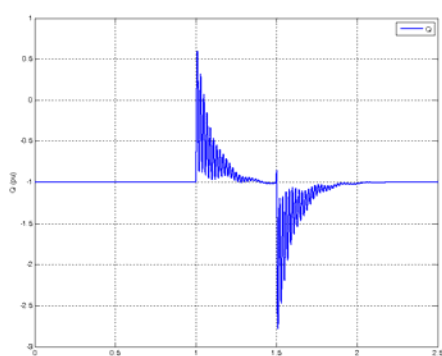


Fig 5.6. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

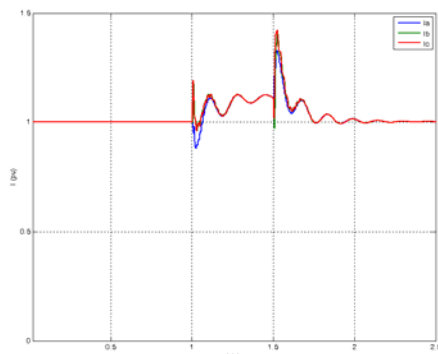


Fig 5.3. Corriente rms del generador durante el ensayo

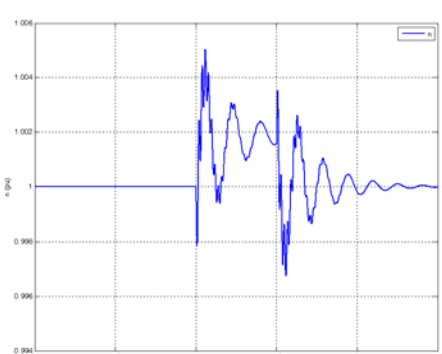


Fig 5.7. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

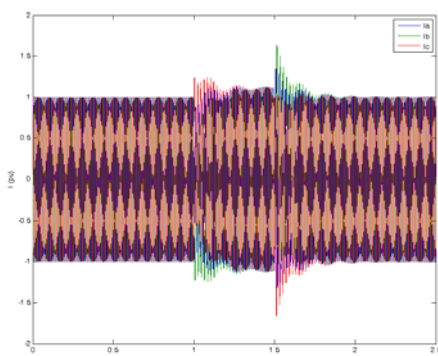


Fig 5.4. Corriente trifásica del generador durante el ensayo

Como se puede observar, un hueco de tensión residual del 90% provoca una respuesta muy violenta, aunque perfectamente soportable por el generador. Las protecciones no actúan en ningún momento, por lo que el generador puede seguir acoplado a la red.

Hueco simétrico, tensión residual 70%, duración 500 ms

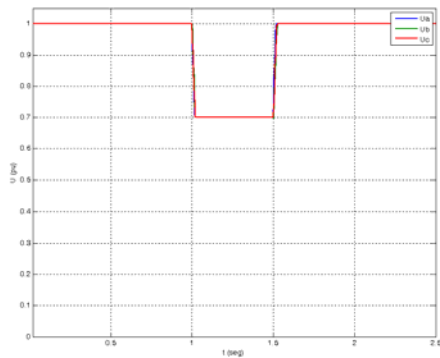


Fig 5.8. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

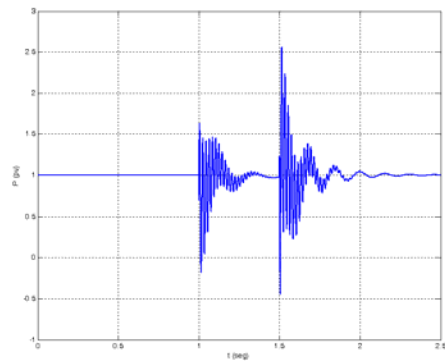


Fig 5.12. Potencia activa del generador durante el ensayo

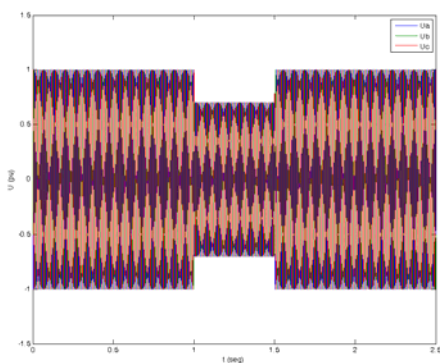


Fig 5.9. Evolución de la tensión trifásica durante el ensayo

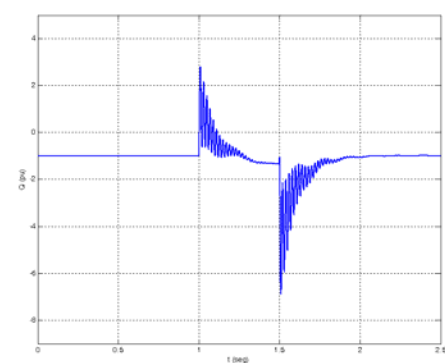


Fig 5.13. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

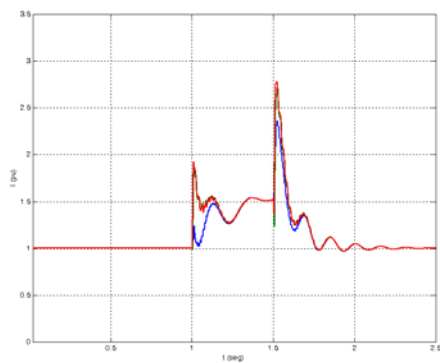


Fig 5.10. Corriente rms del generador durante el ensayo

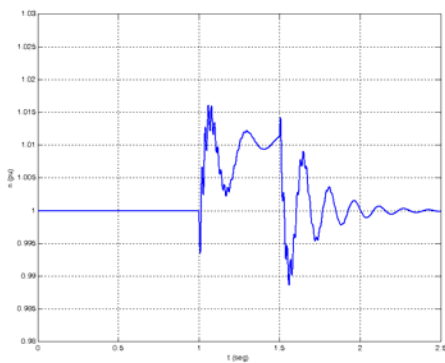


Fig 5.14. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

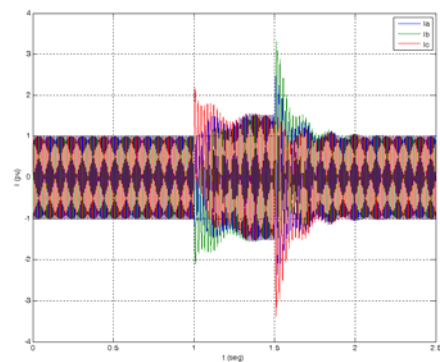


Fig 5.11. Corriente trifásica del generador durante el ensayo

En este caso, el generador será desconectado de la red por la actuación de la protección de sobrecorriente en la salida de la perturbación de la tensión. Es probable que en la entrada del hueco el generador no sea desconectado.

La protección de sobrevelocidad no actuará en ningún momento.

Hueco simétrico, tensión residual 50%, duración 500 ms

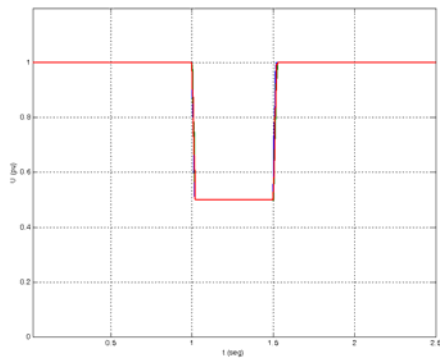


Fig 5.15. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

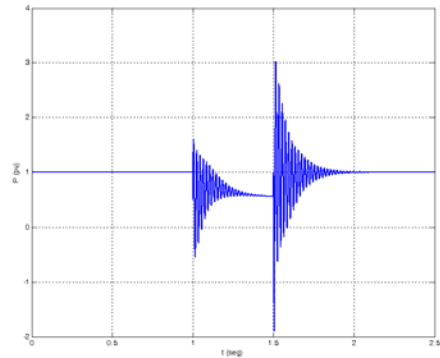


Fig 5.19. Potencia activa del generador durante el ensayo

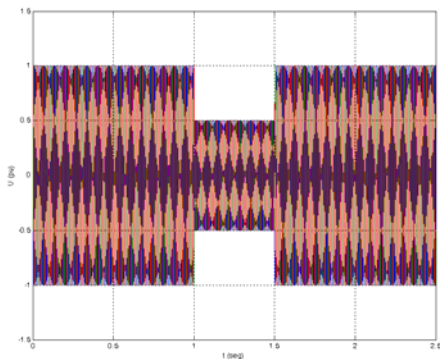


Fig 5.16. Evolución de la tensión trifásica durante el ensayo

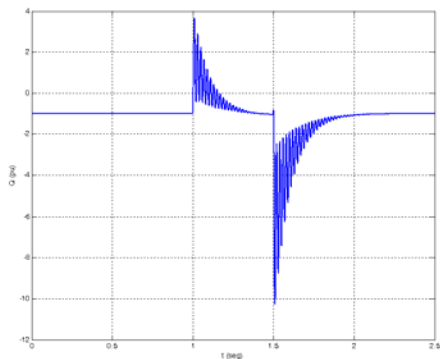


Fig 5.20. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

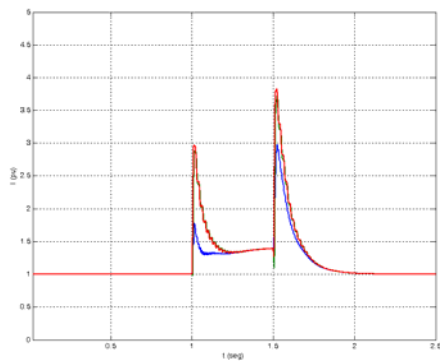


Fig 5.17. Corriente rms del generador durante el ensayo

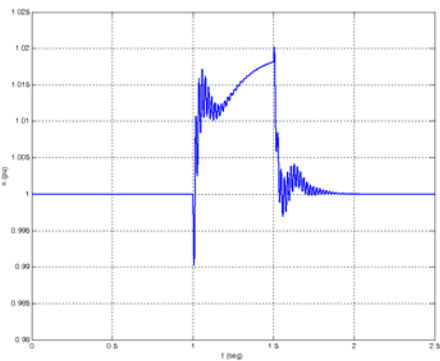


Fig 5.21. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

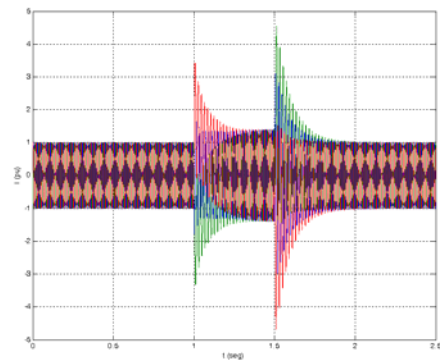


Fig 5.18. Corriente trifásica del generador durante el ensayo

Al igual que ocurría en el ensayo anterior, la protección de sobrecorriente desconectará el generador de la red, aunque en este caso en la entrada del hueco. Se observa que la velocidad alcanza valores importantes, lo que es debido a la caída en la potencia que se observa en Fig 5.19. Al no haber suficiente par no se puede frenar la máquina, y tiende a aparecer sobrevelocidad.

Hueco simétrico, tensión residual 30%, duración 500 ms

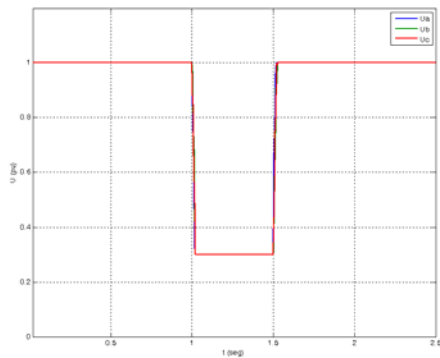


Fig 5.22. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

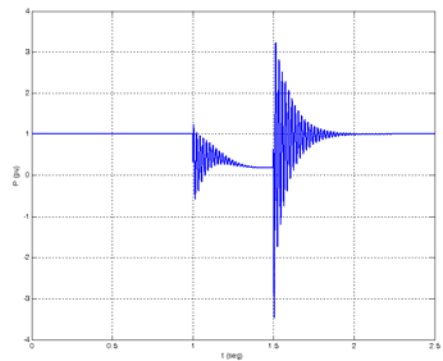


Fig 5.26. Potencia activa del generador durante el ensayo

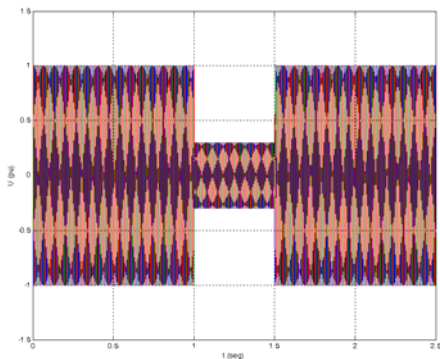


Fig 5.23. Evolución de la tensión trifásica durante el ensayo

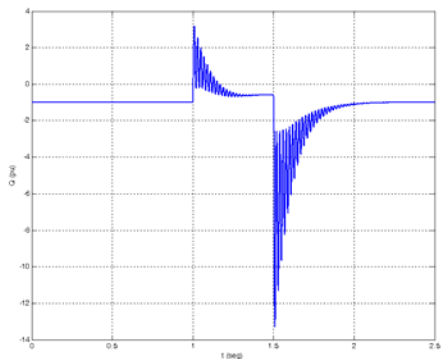


Fig 5.27. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

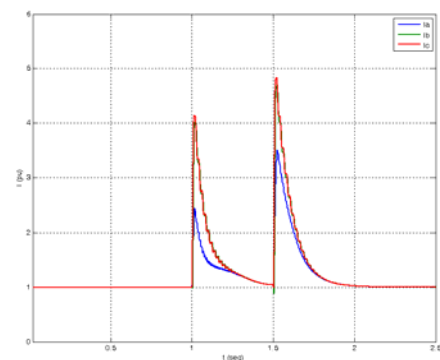


Fig 5.24. Corriente rms del generador durante el ensayo

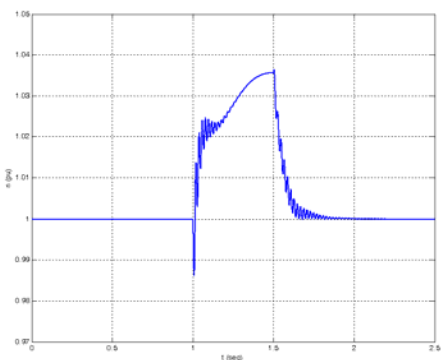


Fig 5.28. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

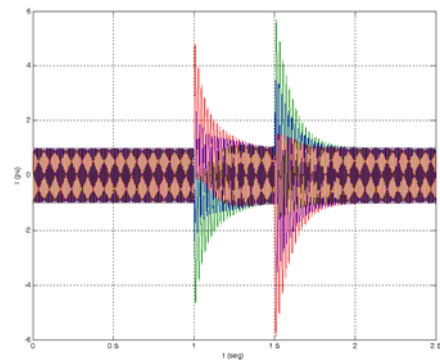


Fig 5.25. Corriente trifásica del generador durante el ensayo

Con un hueco del 30% de tensión residual el generador será desconectado de la red por la protección de sobrecorriente.

La protección de sobrevelocidad no actuará, aunque se aproxima a su límite de activación.

Hueco simétrico, tensión residual 15%, duración 500 ms

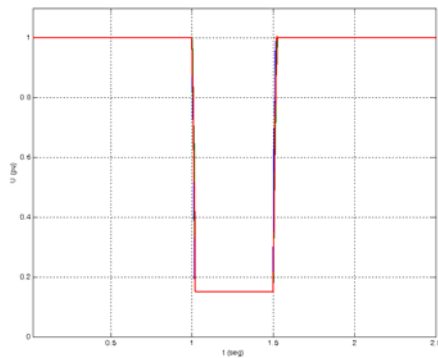


Fig 5.29. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

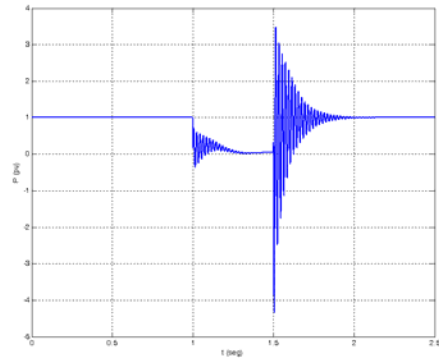


Fig 5.33. Potencia activa del generador durante el ensayo

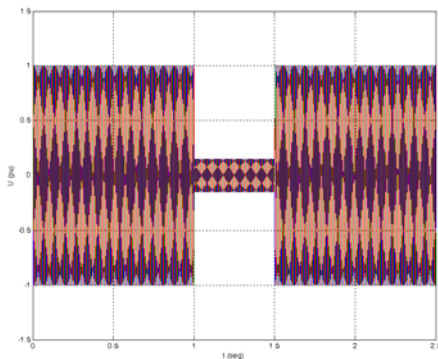


Fig 5.30. Evolución de la tensión trifásica durante el ensayo

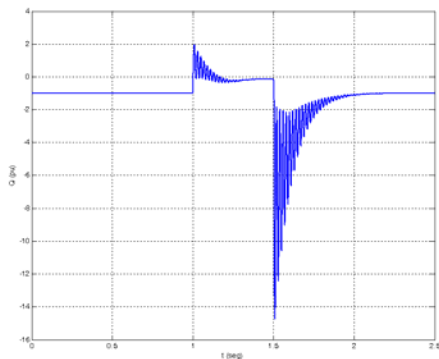


Fig 5.34. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

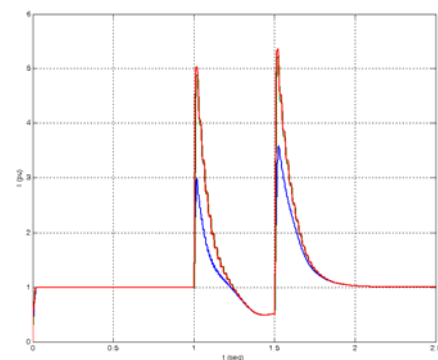


Fig 5.31. Corriente rms del generador durante el ensayo

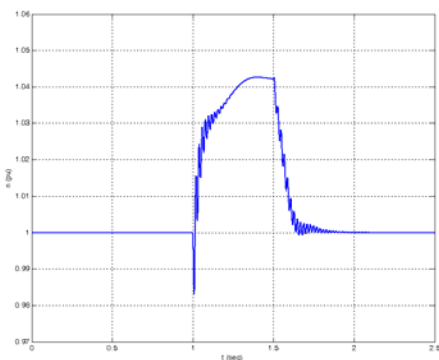


Fig 5.35. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

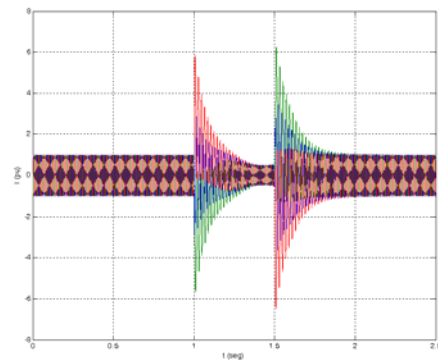
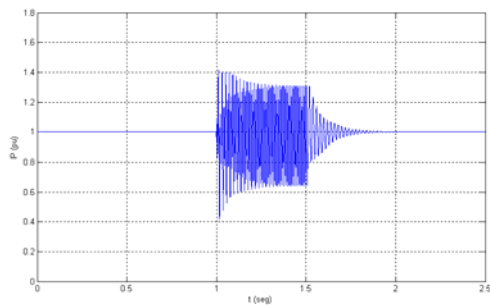
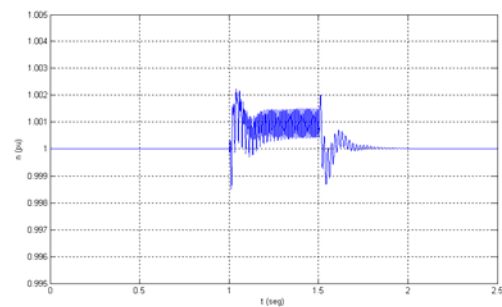
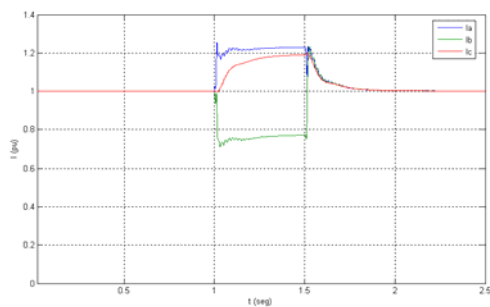
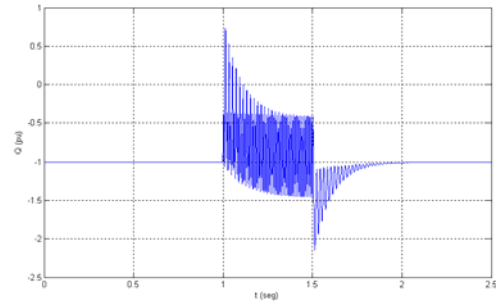
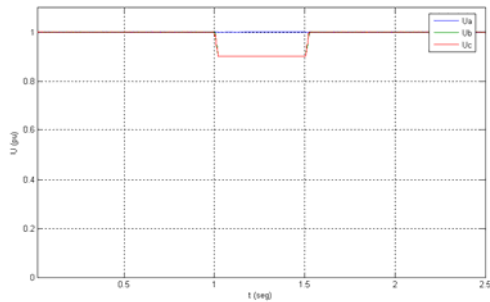


Fig 5.32. Corriente trifásica del generador durante el ensayo

En el hueco de tensión residual 15%, la corriente toma valores en ningún caso aceptables, la máquina desconecta instantáneamente por sobrecorriente.

Como se observa en la Fig 5.35, la protección de sobrevelocidad actuaría en caso de no actuar la de sobrecorriente

Hueco asimétrico, tensión residual 90%, duración 500 ms



En los huecos asimétricos se observan una serie de oscilaciones en todas y cada una de las variables del generador, debidas fundamentalmente a someter al generador a una secuencia inversa en la entrada de tensión.

Como puede verse en las figuras Fig 5.36 a Fig 5.40 un hueco bifásico con una tensión residual del 90% (en los huecos bifásicos siempre se hablará de tensiones de fase) no provocaría la desconexión del generador de la red a la que estuviera conectado, ya que ni la corriente máxima ni la sobrevelocidad alcanzan los límites fijados por las protecciones.

Hueco asimétrico, tensión residual 70%, duración 500 ms

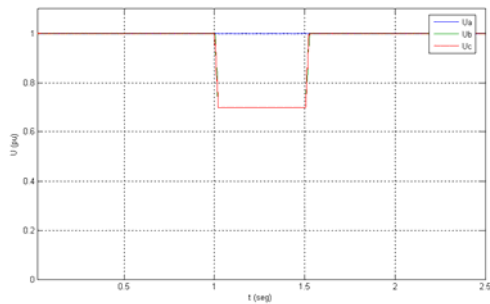


Fig 5.41. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

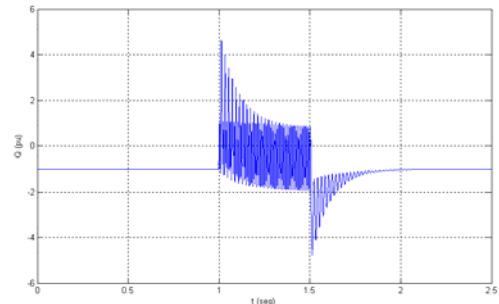


Fig 5.44. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

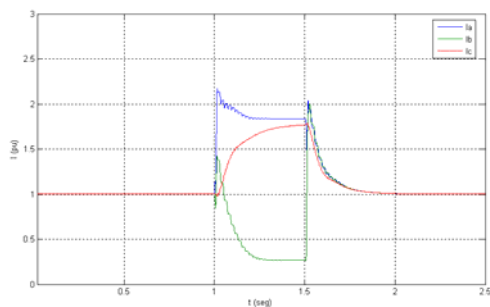


Fig 5.42. Corriente rms del generador durante el ensayo

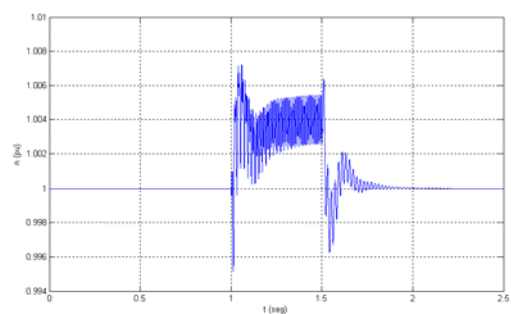


Fig 5.45. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

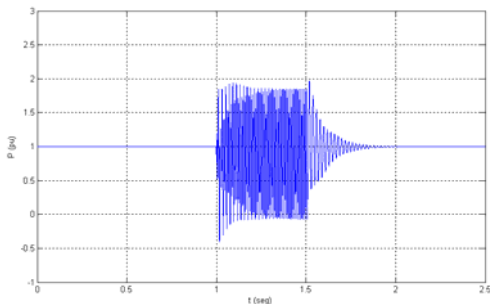


Fig 5.43. Potencia activa del generador durante el ensayo

En el caso de un hueco de tensión bifásico en el que se obtenga una tensión residual del 70% la máquina en estudio experimentaría la desconexión de la red por causa de la protección de sobrecorriente ya que, como se observa en la Fig 5.42, tanto en la entrada como en la salida del hueco se obtienen valores de corriente iguales o superiores a 2 pu, valor en el que se encuentra tarada la protección.

La protección de sobrevelocidad no llegaría a actuar aunque no lo hiciera la protección de corriente, ya que no se observa sobrevelocidad superior al 4,3%.

Hueco asimétrico, tensión residual 50%, duración 500 ms

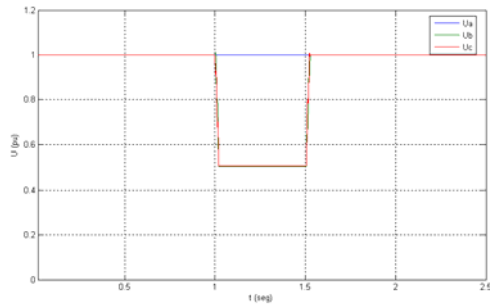


Fig 5.46. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

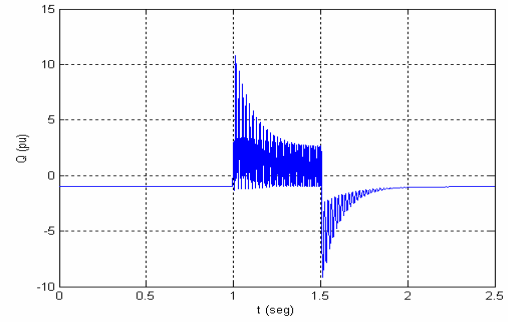


Fig 5.49. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

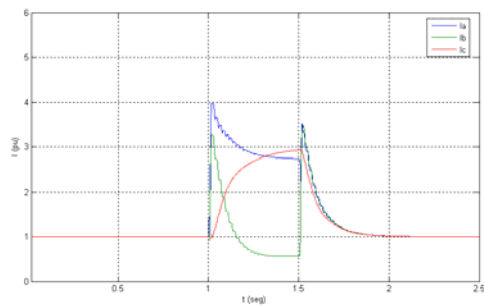


Fig 5.47. Corriente rms del generador durante el ensayo

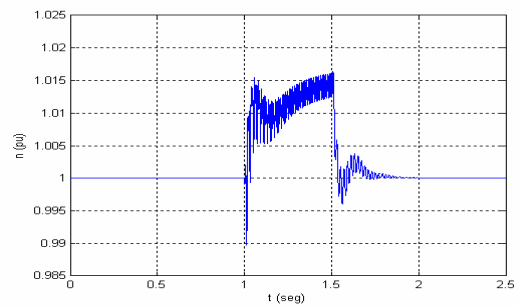


Fig 5.50. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

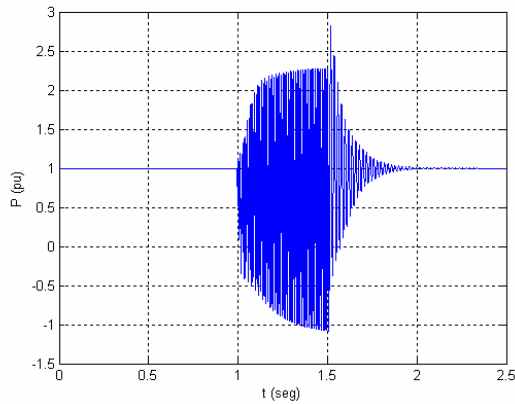


Fig 5.48. Potencia activa del generador durante el ensayo

En este caso la desconexión del aerogenerador es instantánea en el comienzo del hueco de tensión ya que se alcanzan valores de corriente extremadamente elevados (Fig 5.47). Sin embargo, tal y como se observa en la figura Fig 5.50, no se activaría la protección de sobrevelocidad.

5.3 Generador asíncrono doblemente alimentado

Hueco simétrico, tensión residual 90%, duración 500 ms

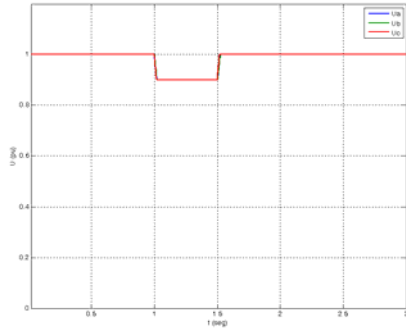


Fig 5.51. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

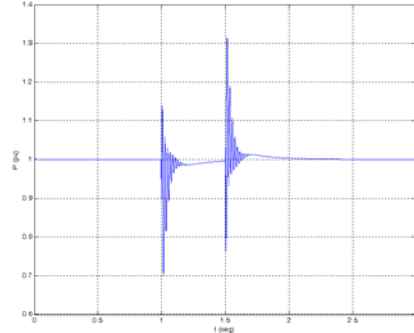


Fig 5.55. Potencia activa del generador durante el ensayo

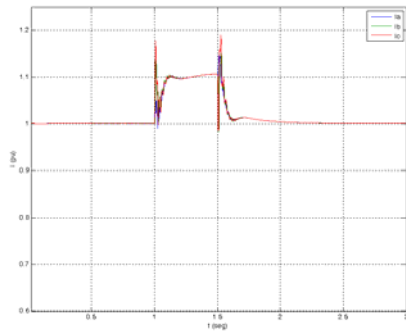


Fig 5.52. Corriente rms del estator durante el ensayo

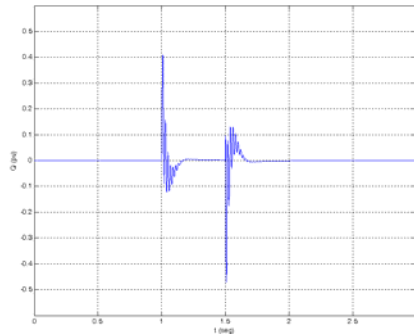


Fig 5.56. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

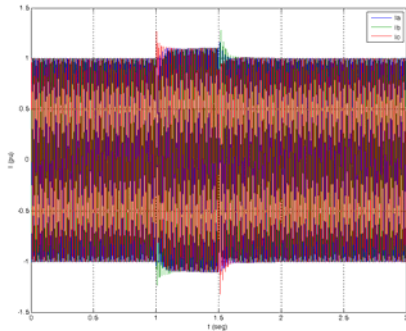


Fig 5.53. Corriente trifásica del estator durante el ensayo

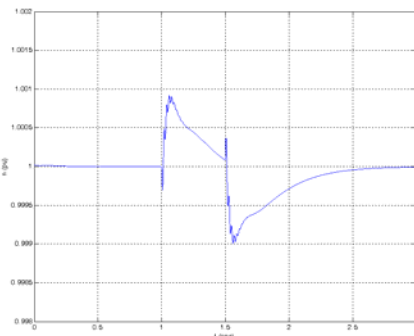


Fig 5.57. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

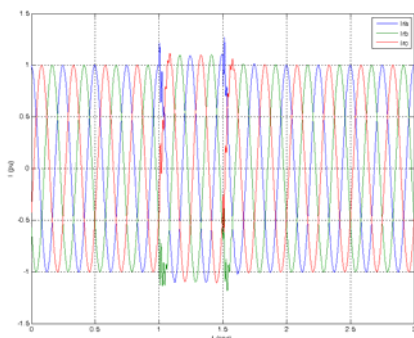


Fig 5.54. Corriente trifásica del rotor durante el ensayo

Según el tarado de las protecciones de la tabla 5.2, el generador permanecería acoplado a la red sin ningún problema durante todo el transcurso de la perturbación.

El control es capaz de mantener la consigna de potencia, ya que no se ha llegado al límite de corriente rotórica.

Hueco simétrico, tensión residual 70%, duración 500 ms

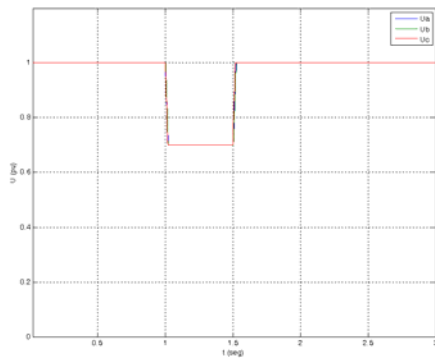


Fig 5.58. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

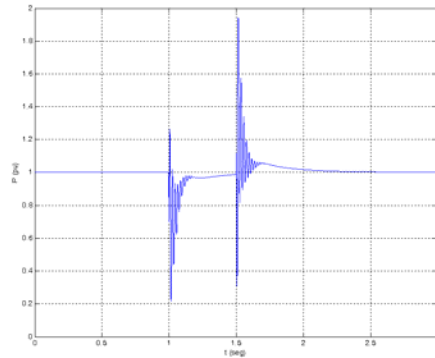


Fig 5.62. Potencia activa del generador durante el ensayo

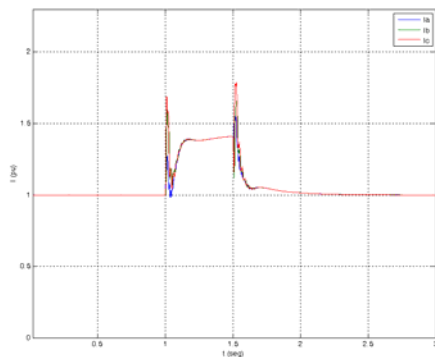


Fig 5.59. Corriente rms del estator durante el ensayo

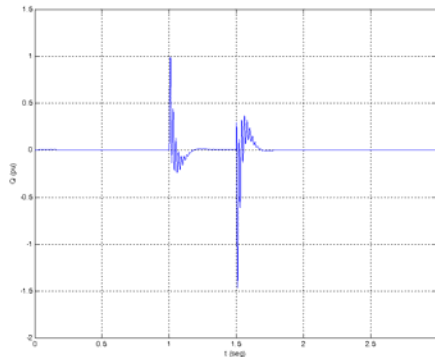


Fig 5.63. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

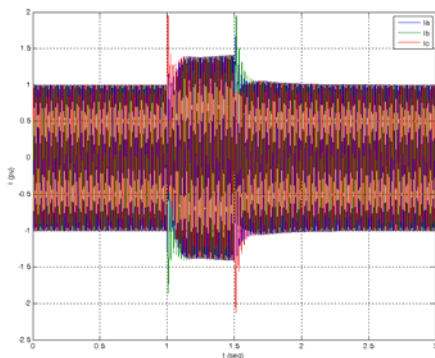


Fig 5.60. Corriente trifásica del estator durante el ensayo

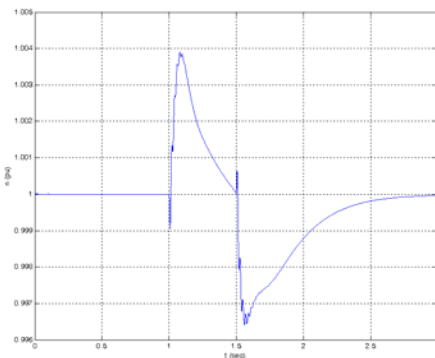


Fig 5.64. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

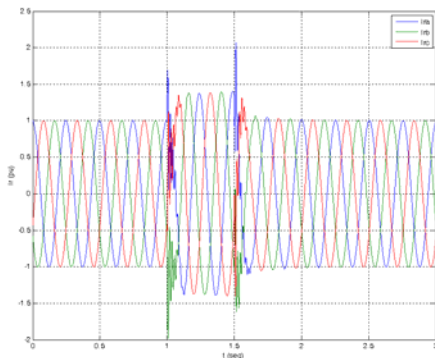


Fig 5.61. Corriente trifásica del rotor durante el ensayo

La máquina doblemente alimentada sometida al hueco de tensión de la figura Fig 5.58, se desconectaría de la red a la que estuviera conectada debido al tarado de la protección de sobrecorriente rotórica. En la Fig 5.61 se observa como se alcanza el límite impuesto (2 pu) durante la recuperación de la tensión. El resto de protecciones no llegarían a actuar. El control es capaz de mantener la consigna de potencia.

Hueco simétrico, tensión residual 50%, duración 500 ms

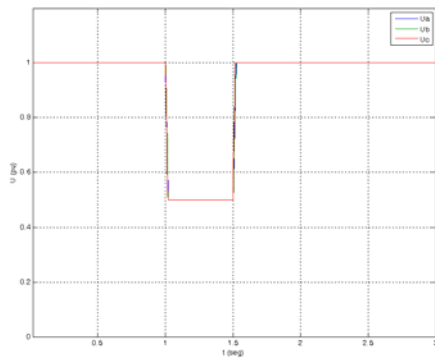


Fig 5.65. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

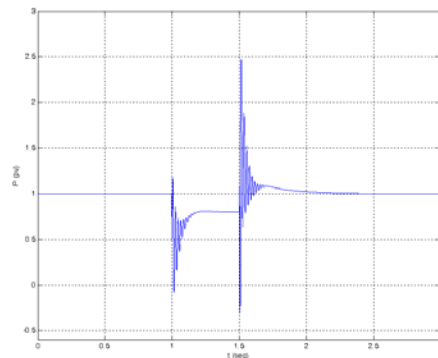


Fig 5.69. Potencia activa del generador durante el ensayo

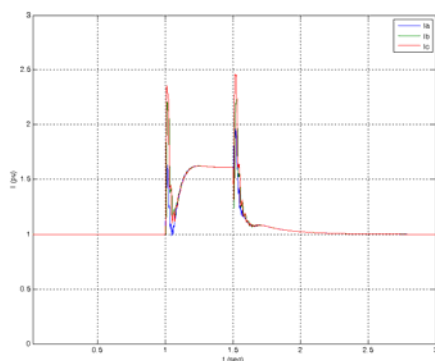


Fig 5.66. Corriente rms del estator durante el ensayo

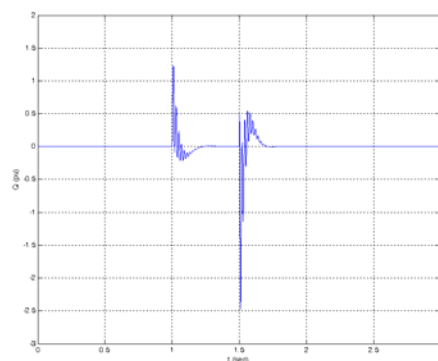


Fig 5.70. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

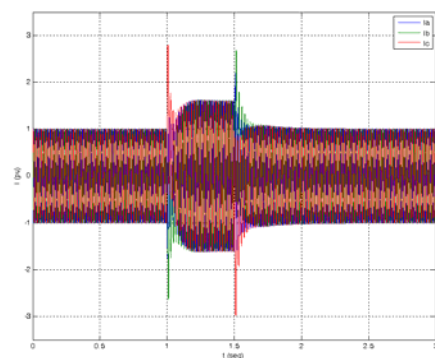


Fig 5.67. Corriente trifásica del estator durante el ensayo

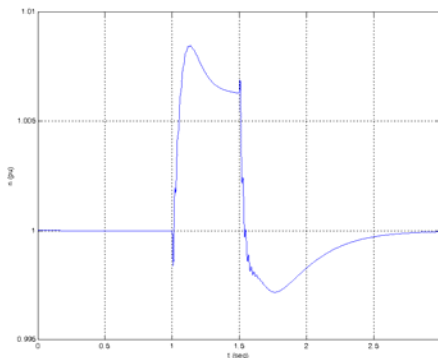


Fig 5.71. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

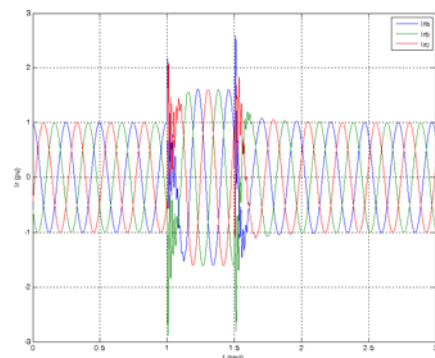


Fig 5.68. Corriente trifásica del rotor durante el ensayo

En el caso de hueco del 50% de tensión residual la máquina se desconecta por superarse tanto la corriente máxima del estator como la del rotor (2 pu). Además, en caso de no darse la desconexión, se ha llegado al límite impuesto en el control para la corriente rotórica (1,5 pu), por lo que no se es capaz de mantener la potencia activa en la consigna dada (1 pu).

Hueco simétrico, tensión residual 30%, duración 500 ms

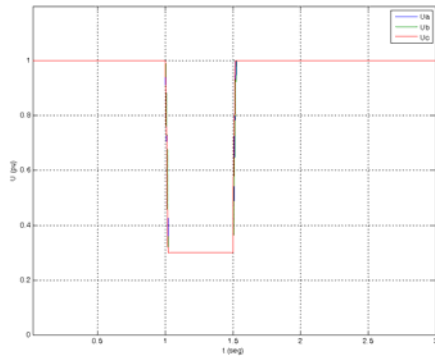


Fig 5.72. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

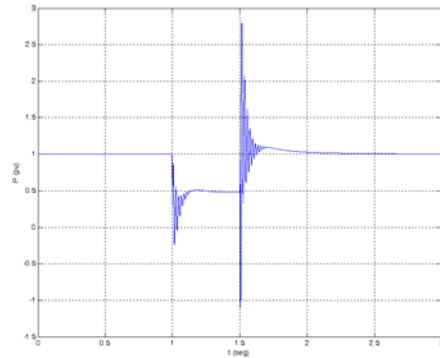


Fig 5.76. Potencia activa del generador durante el ensayo

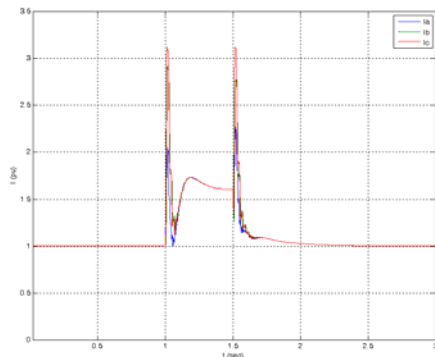


Fig 5.73. Corriente rms del estator durante el ensayo

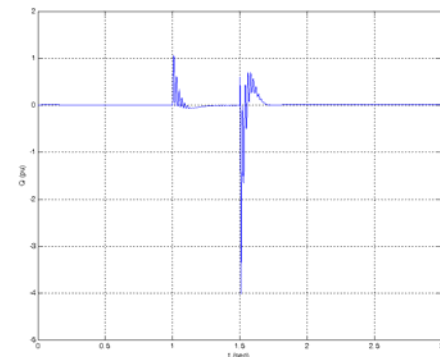


Fig 5.77. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

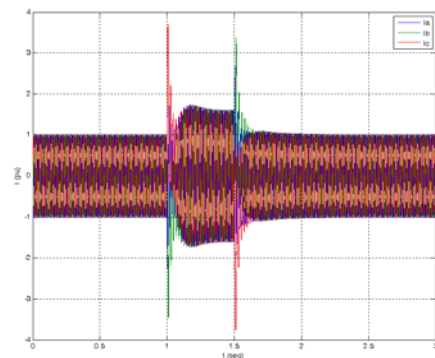


Fig 5.74. Corriente trifásica del estator durante el ensayo

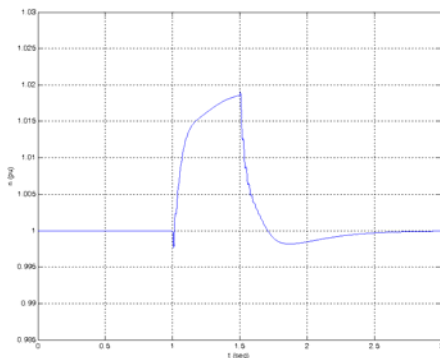


Fig 5.78. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

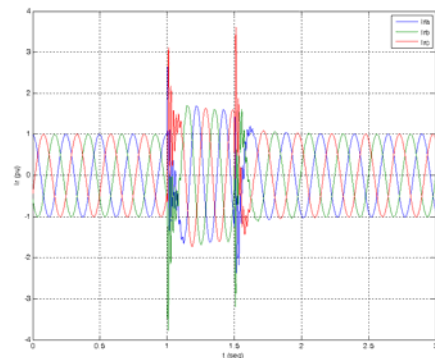


Fig 5.75. Corriente trifásica del rotor durante el ensayo

Al igual que en el caso anterior el generador no permanecerá conectado a la red por la actuación de las protecciones de sobrecorriente. De nuevo, la limitación de la consigna de corriente rotórica impide que el control pueda mantener la potencia activa en el valor asignado.

Hueco simétrico, tensión residual 15%, duración 500 ms

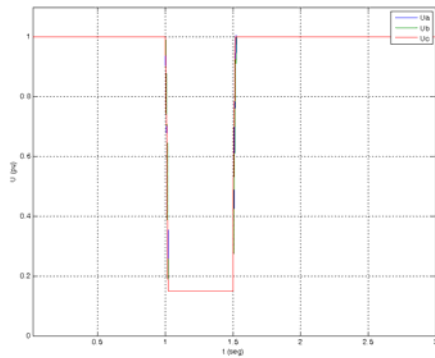


Fig 5.79. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

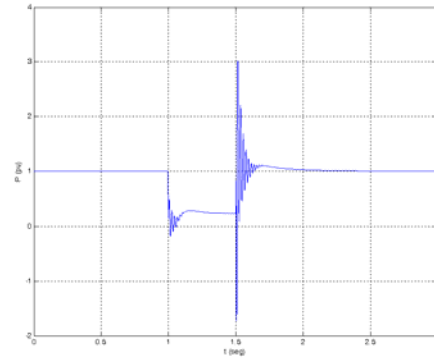


Fig 5.83. Potencia activa del generador durante el ensayo

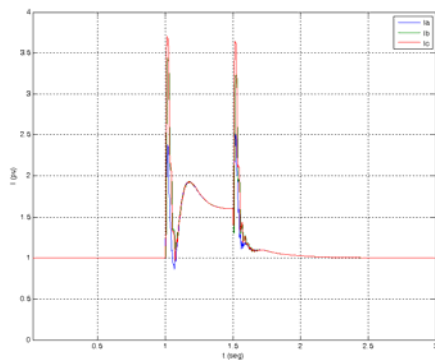


Fig 5.80. Corriente rms del estator durante el ensayo

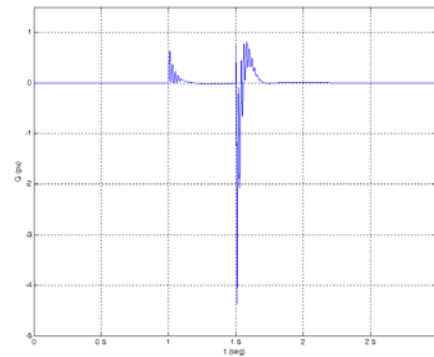


Fig 5.84. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

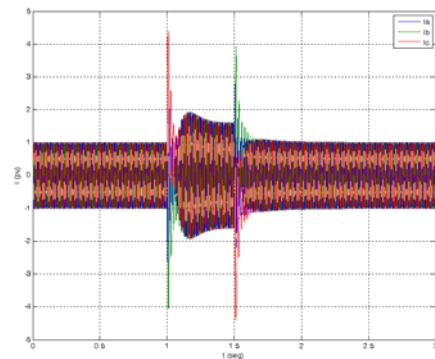


Fig 5.81. Corriente trifásica del estator durante el ensayo

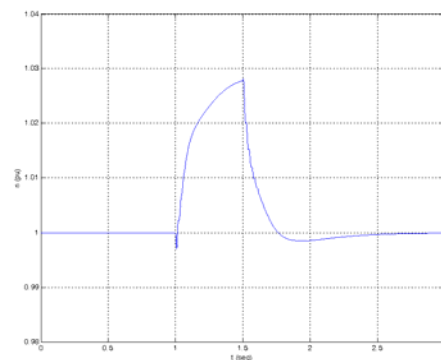


Fig 5.85. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

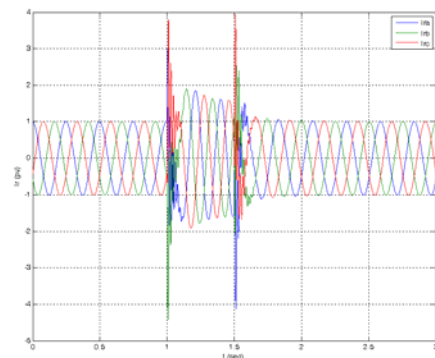


Fig 5.82. Corriente trifásica del rotor durante el ensayo

En este caso todas las variables significativas toman valores extremos, produciendo necesariamente la desconexión del generador. La sobrecorriente rotórica podría llegar a destruir el convertidor si no se tomaran medidas instantáneamente. Además la velocidad comienza a tomar valores muy elevados por la falta de par motor que produce la caída de potencia.

Hueco asimétrico, tensión residual 90%, duración 500 ms

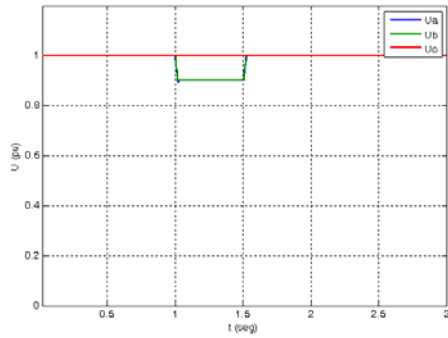


Fig 5.87. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

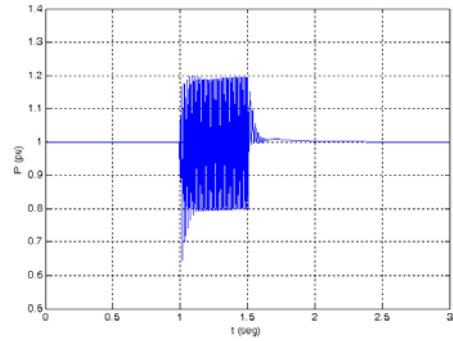


Fig 5.91. Potencia activa del generador durante el ensayo

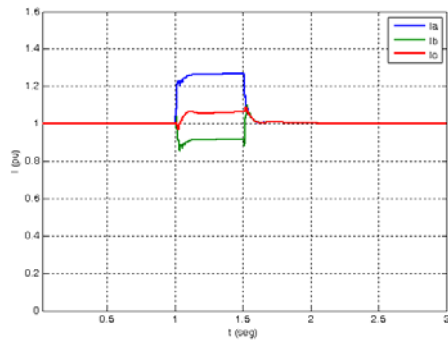


Fig 5.88. Corriente rms del estator durante el ensayo

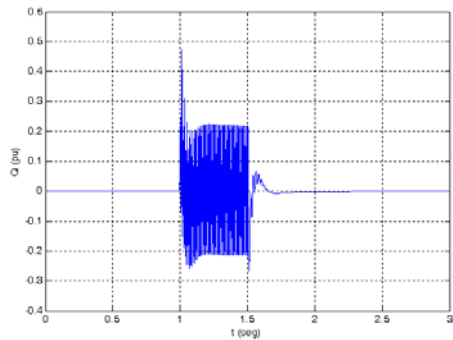


Fig 5.92. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

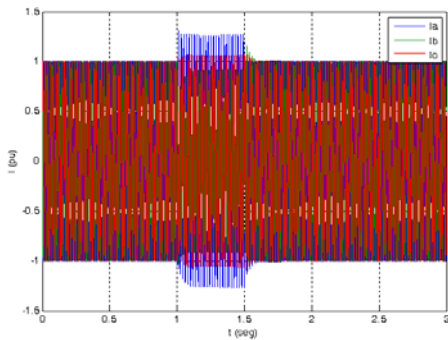


Fig 5.89. Corriente trifásica del estator durante el ensayo

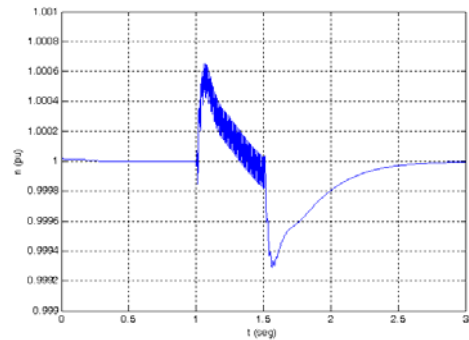


Fig 5.93. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

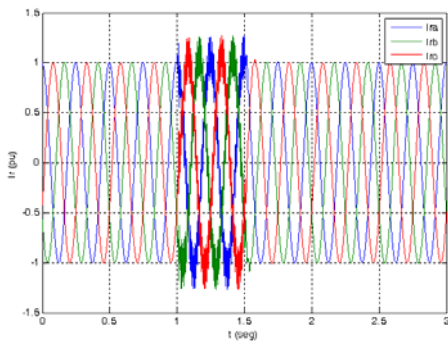


Fig 5.90. Corriente trifásica del rotor durante el ensayo

Al igual que ocurría en el caso de generador asíncrono de jaula, se observan muchas oscilaciones en todas las variables debido al desequilibrio en la entrada de tensión. Aun con esto, con un hueco bifásico de tensión residual del 90% la máquina permanecería conectada en todo momento al no activarse las protecciones.

Hueco asimétrico, tensión residual 70%, duración 500 ms

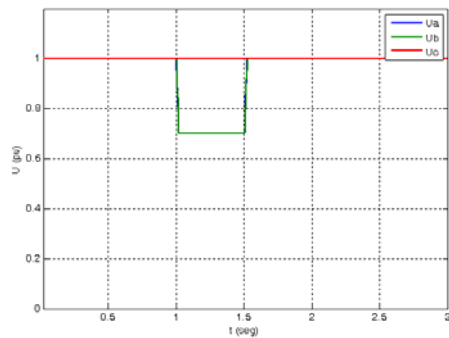


Fig 5.94. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

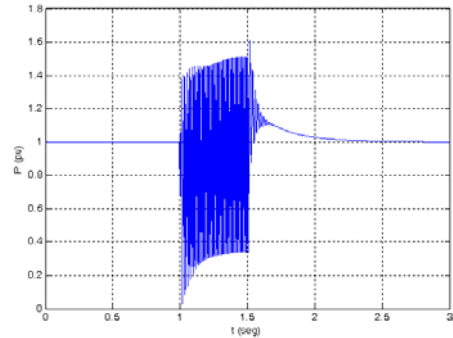


Fig 5.98. Potencia activa del generador durante el ensayo

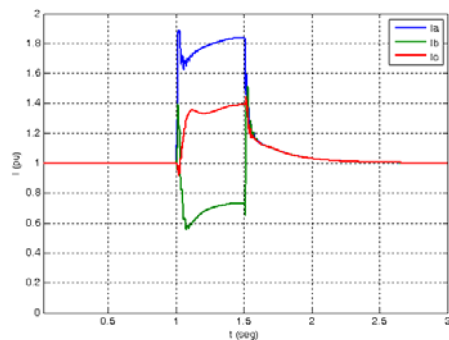


Fig 5.95. Corriente rms del estator durante el ensayo

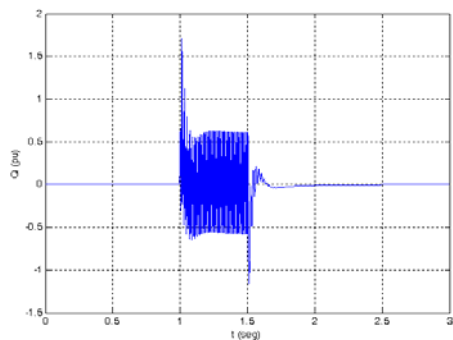


Fig 5.99. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

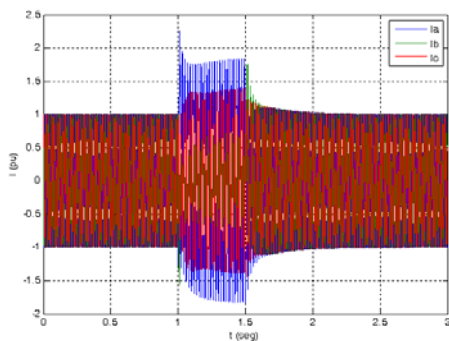


Fig 5.96. Corriente trifásica del estator durante el ensayo

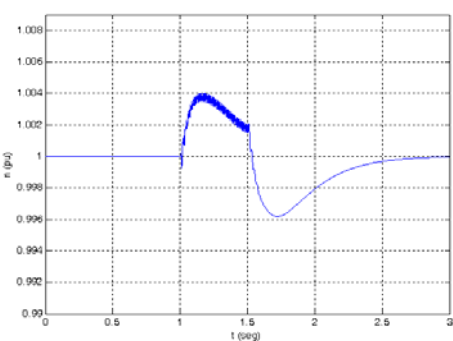


Fig 5.100. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

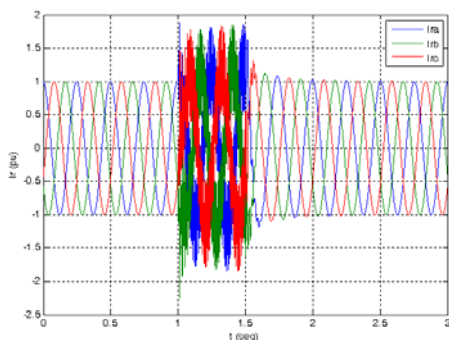


Fig 5.97. Corriente trifásica del rotor durante el ensayo

Un hueco bifásico de tensión residual del 70% provocaría desconexión del generador de la red por sobrecorriente en una de las fases del estator durante la entrada del hueco. Como puede verse en la Fig. 5.96, la corriente de la fase A alcanza un valor de 2.25 pu.

El resto de protecciones no llegarían a actuar en ningún momento.

Hueco asimétrico, tensión residual 50%, duración 500 ms

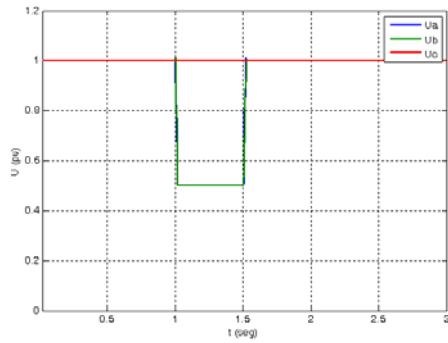


Fig 5.101. Evolución de la tensión rms durante el ensayo

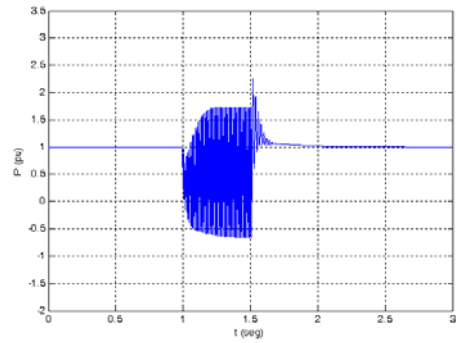


Fig 5.106. Potencia activa del generador durante el ensayo

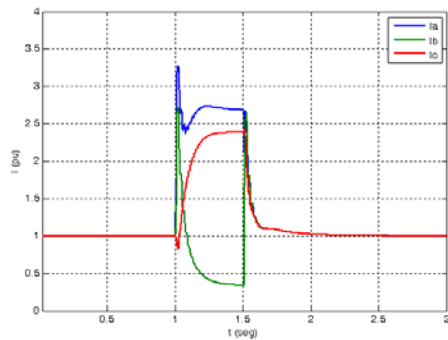


Fig 5.102. Corriente rms del estator durante el ensayo

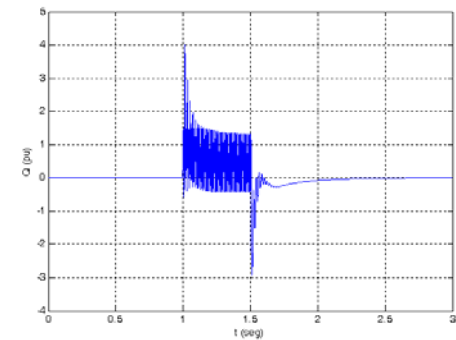


Fig 5.107. Potencia reactiva del generador durante el ensayo

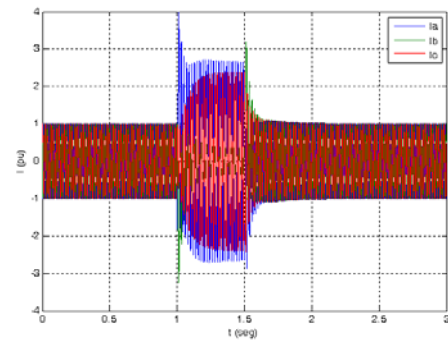


Fig 5.103. Corriente trifásica del estator durante el ensayo

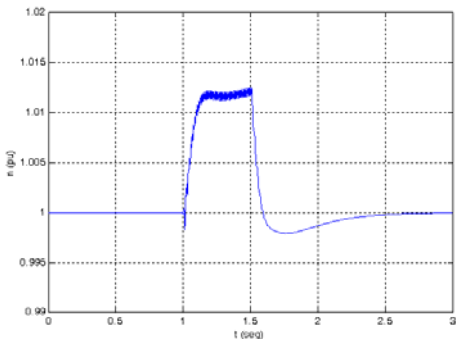


Fig 5.108. Evolución de la velocidad del generador durante el ensayo, respecto de la nominal

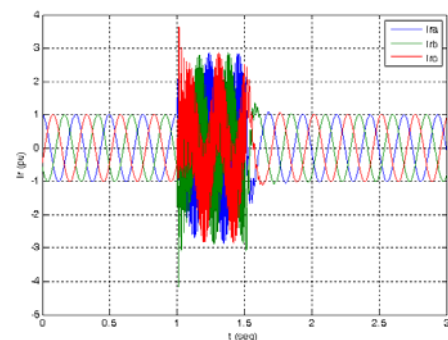


Fig 5.104. Corriente trifásica del rotor durante el ensayo

Al igual que en el caso anterior, la desconexión del generador de red está asegurada. Tanto la protección de sobrecorriente del estator como la del rotor se activarían en la entrada del hueco de tensión. Sin embargo, no se observa una aceleración excesiva del rotor, por lo que esta protección no actuaría.

De los resultados anteriores se pueden obtener las siguientes conclusiones:

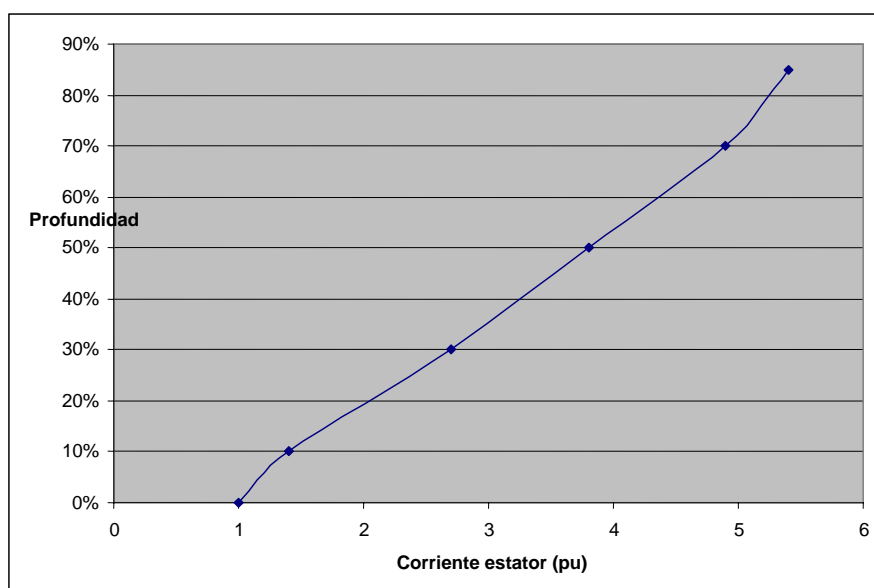
- Durante la entrada en el hueco se produce un incremento instantáneo de la corriente del estator y de la potencia reactiva inyectada en la red así como una caída en la potencia activa generada.
- Durante la salida del hueco se produce un gran incremento de la corriente del estator, aún mayor al pico registrado durante la entrada del hueco. Además, se produce un pico de consumo de potencia reactiva que puede llegar a tomar valores muy elevados, así como una elevación instantánea de la potencia activa entregada a la red.
- En el caso del generador doblemente alimentado se produce, tanto en la entrada como en la salida del hueco, un pico de corriente rotórica que podría llegar a destruir el convertidor. Además, con el fin de mantener la consigna de potencia, el control aumenta de manera generalizada durante el hueco el nivel de corriente que circula por los devanados del rotor, llegando a saturar el control en el caso de huecos de profundidad moderada (en las simulaciones esta saturación se da a partir de una tensión residual del 70%). En este caso la limitación impuesta al control actúa y la máquina no es capaz de seguir la consigna de generación de potencia establecida.
- Ambos generadores al ser sometidos a un hueco de tensión desequilibrado responden con violentas oscilaciones en la potencia (en el caso de la máquina asíncrona de jaula, con tensión residual del 50%, las oscilaciones en potencia activa alcanzan una amplitud de 3,5 pu). Esto se traduce en oscilaciones de par que podrían ocasionar problemas de fatiga en la mecánica del generador.
- En todos los casos se produce una aceleración de la máquina debido fundamentalmente a que la pérdida de potencia activa provoca una caída en el par mecánico del generador, dando como resultado un par positivo que provoca un aumento de la velocidad.
- Según aumenta la profundidad del hueco de tensión aplicado, las variables alcanzan valores más extremos, aumentando la posibilidad de darse desconexión del generador por la actuación de las protecciones.

| Máquina | Tensión residual | 90% | 70% | 50% | 30% | 15% |
|---------|---------------------------|------|-----|-----|-----|-----|
| Jaula | Sobrecorriente (pu) | 1,4 | 2,7 | 3,8 | 4,9 | 5,4 |
| | Sobrevelocidad (%) | 0,5 | 1,5 | 2,0 | 3,5 | 4,3 |
| DFIG | Sobrecorriente (pu) | 1,2 | 1,8 | 2,5 | 3,1 | 3,7 |
| | Sobrecorriente rotor (pu) | 1,25 | 2 | 2,5 | 3,5 | 4,0 |
| | Sobrevelocidad (%) | 0,1 | 0,4 | 0,8 | 1,9 | 2,8 |

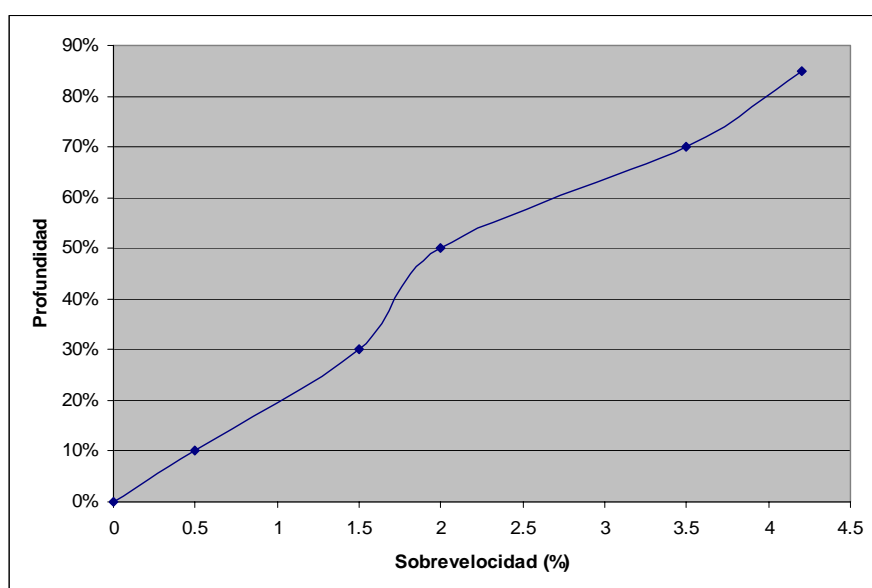
Tabla 5.3. Resultado de las simulaciones de huecos de tensión trifásicos en los generadores. En naranja se marcan los valores que sobrepasan los límites de las protecciones.

| Máquina | Tensión residual | 90% | 70% | 50% |
|--------------|----------------------------------|------|-----|------|
| Jaula | Sobrecorriente (pu) | 1,25 | 2,2 | 4 |
| | Sobrevelocidad (%) | 0,2 | 0,7 | 1,6 |
| DFIG | Sobrecorriente (pu) | 1,25 | 1,9 | 3,3 |
| | Sobrecorriente rotor (pu) | 1,25 | 1,8 | 3,6 |
| | Sobrevelocidad (%) | 0 | 0,4 | 1,25 |

*Tabla 5.4. Resultado de las simulaciones de huecos de tensión bifásicos en los generadores.
En naranja se marcan los valores que sobrepasan los límites de las protecciones.*



*Fig. 5.109. Relación entre la corriente máxima de estator y la profundidad del hueco de tensión aplicado.
Generador asíncrono de jaula.*



*Fig. 5.110. Relación entre la sobrevelocidad y la profundidad del hueco de tensión aplicado.
Generador asíncrono de jaula.*

5.4 Respuesta de generadores reales ante huecos de tensión

Los resultados para los dos generadores demuestran la importancia de tener en cuenta las perturbaciones en la tensión para la integración en red de la generación de potencia basada en generadores asíncronos, como es el caso de la generación eólica. La respuesta de los generadores obtenida de simulaciones es muy importante puesto que la realización de un ensayo de huecos de tensión en máquinas reales supone, en muchos casos, la destrucción del generador si no se establecen estrategias de control suficientes para garantizar la seguridad de todos los componentes.

La Fig 5.111 muestra la respuesta de un generador eólico real, con máquina asíncrona de doble alimentación, ante un hueco de tensión.

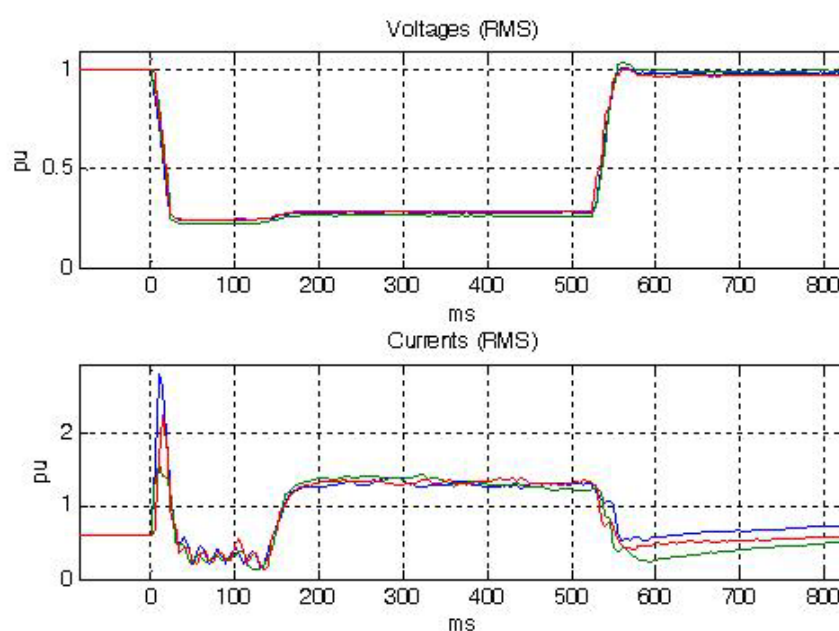


Fig 5.111. Respuesta de un aerogenerador con máquina asíncrona doblemente alimentada ante un hueco de tensión con tensión residual del 25% y control durante el hueco. Cortesía de Energy to Quality S.L.

Como puede observarse, durante los primeros instantes de la perturbación el comportamiento es exactamente igual al obtenido en las simulaciones (Fig. 5.73). A partir del pico de corriente inicial el control del generador se encarga de ajustar los parámetros necesarios de forma que se proteja el propio generador y se cumplan los requisitos que el operador de la red a la que se encuentre conectado establezca (en este caso, Red Eléctrica de España, ver Anexo)

Por ser un ensayo con una alta probabilidad de fallo del generador, es prácticamente imposible encontrar un gráfico en el que se pueda seguir la respuesta a plena carga ante un hueco de tensión sin ningún tipo de medida de seguridad. En este sentido, la Fig 5.112 muestra la respuesta de un generador asíncrono de jaula en baja carga, sin control ni dispositivos de seguridad. Se ha tomado entregando una potencia del 25% para que la sobrecorriente no ocasionase problemas. La respuesta es similar a la obtenida en la Fig 5.10.

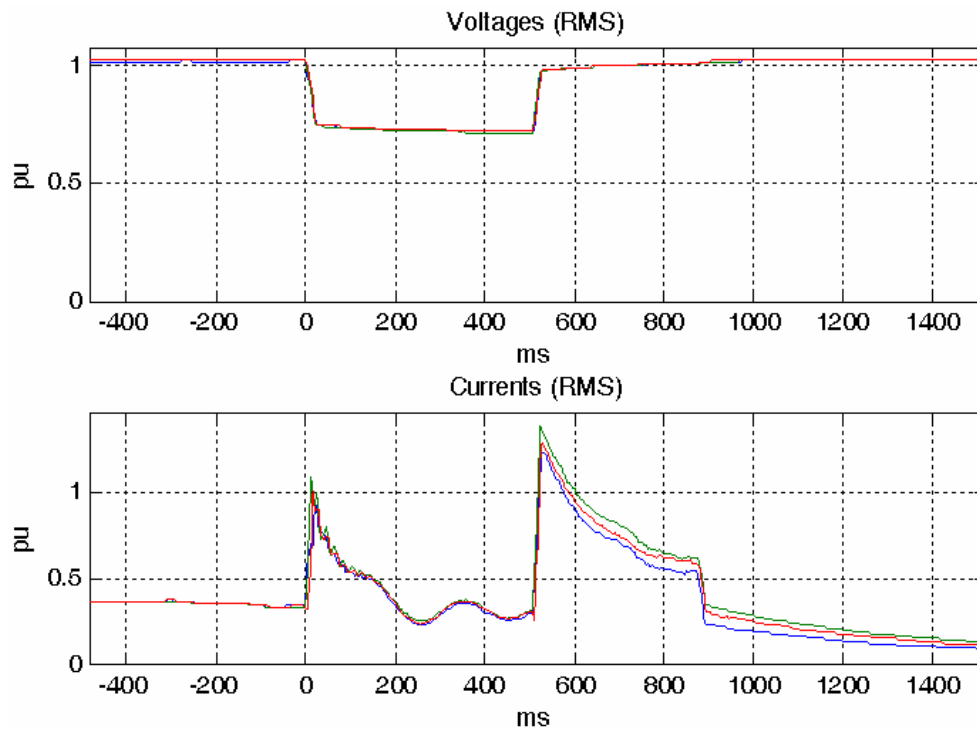


Fig 5.112. Respuesta de un aerogenerador con máquina asíncrona de jaula ante un hueco de tensión con tensión residual del 75%. Cortesía de Energy to Quality S.L.

Por último se muestra la respuesta de un generador de jaula ante un hueco bifásico con tensión residual del 80% en el que se puede apreciar el desequilibrio entre fases en tensiones y corrientes, semejante al ensayo de la Fig 5.37, con resultado de desconexión del generador a los 230 ms del comienzo de la perturbación (Fig 5.113 y 5.114):

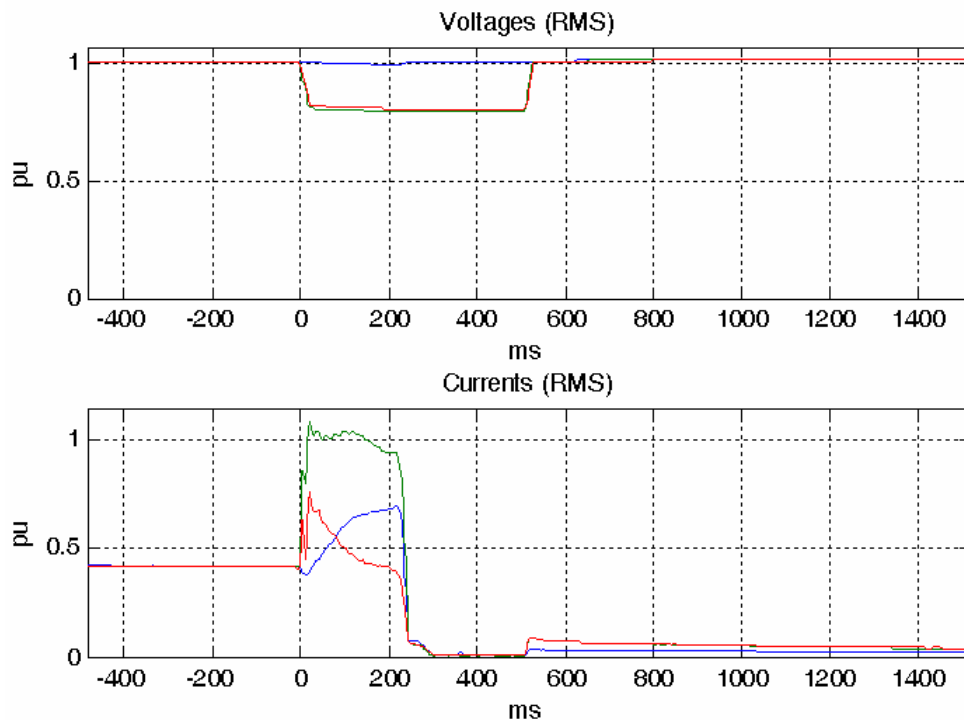


Fig 5.113. Respuesta de un aerogenerador con máquina asíncrona de jaula ante un hueco de tensión bifásico con tensión residual del 80%, con resultado de desconexión de red. Cortesía de Energy to Quality S.L.

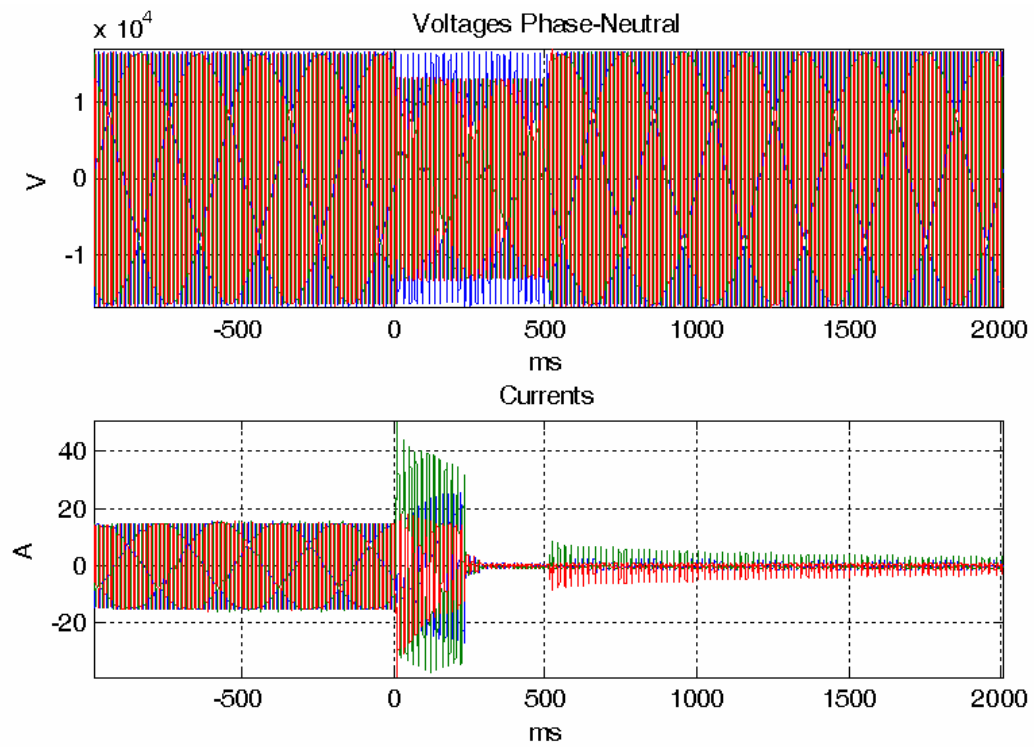


Fig 5.114. Respuesta de un aerogenerador con máquina asíncrona de jaula ante un hueco de tensión bifásico con tensión residual del 80%, tensiones y corrientes trifásicas, con resultado de desconexión de red. Cortesía de Energy to Quality S.L.

6. Conclusiones

6.1 Síntesis

Sobre los huecos de tensión:

1. Se ha realizado una breve introducción a la problemática de los huecos de tensión en los sistemas de potencia, estudiando su origen, su transmisión a través de la red, los tipos más comunes de huecos que pueden encontrarse, su caracterización y el modo en que deben ser estudiados según sea su naturaleza, simétricos o no.
2. Se ha modelado un generador de huecos de tensión respondiendo fielmente a los existentes en la industria eléctrica con el que se puede personalizar la profundidad del hueco obtenido fácilmente.

Sobre los generadores asíncronos:

3. Se han presentado y diferenciado las dos familias de generadores asíncronos, planteado sus ecuaciones y realizado su modelado en una herramienta de simulación.
4. Se ha estudiado y desarrollado el control vectorial para el generador doblemente alimentado.
5. Una vez seleccionados generadores utilizados en la industria se han creado programas para la inicialización de los modelos informáticos y se ha comprobado que son válidos comparando la respuesta con las hojas de características de los generadores reales, según el método que establece Ref [11].

Sobre la respuesta ante huecos de tensión:

6. Se han realizado simulaciones para comprobar la respuesta de los generadores ante huecos de tensión, describiendo el comportamiento de las variables apoyándose en la posibilidad o no de producirse desconexión de la máquina de la red.
7. Se han obtenido curvas que establecen la linealidad de la relación entre los picos de intensidad y las sobrevelocidades obtenidas en los ensayos con la profundidad del hueco de tensión aplicado.
8. Se han comparado los resultados obtenidos con respuestas de generadores eólicos reales ante huecos de tensión.

6.2 Conclusiones

En este trabajo se ha demostrado la dificultad de la integración en red de la generación basada en máquinas asíncronas en el sentido de perturbaciones en la tensión de alimentación. La mayoría de los operadores europeos y, cada vez más, los operadores de redes de todo el mundo están haciendo un gran esfuerzo por endurecer las condiciones de acceso a la red debido a la importancia de mantener el equilibrio entre generación y demanda, para asegurar la estabilidad del sistema

Los resultados arrojados por las simulaciones demuestran la necesidad de llevar a cabo medidas de protección contra los huecos de tensión en este tipo de generadores. En el caso de la máquina asíncrona de jaula, al no existir posibilidad de controlarla, se hace necesaria la instalación de equipos externos que hagan cumplir los requisitos del operador (que no solo pasan por la no desconexión de la red, ver Anexo). Por otro lado, la máquina asíncrona doblemente alimentada ofrece un gran campo de actuación en cuanto al control de todas las variables. Con un control suficientemente rápido y ajustado es posible controlar la respuesta del generador de manera que sea fiable y segura, sin necesidad de instalación de equipos externos muy costosos.

En la actualidad existen multitud de empresas que proporcionan soluciones para ambos tipos de máquinas. Los equipos externos se denominan *FACTS (Flexible AC Transmission System)*, o simplemente *soluciones*, y los propios fabricantes y programadores del control de las máquinas de doble alimentación ponen a la venta software específico para los procedimientos de operación de cada operador.

6.3 Líneas futuras

Este trabajo deja abiertas las puertas para realizar toda una serie de estudios sobre los problemas de la integración en red de la generación eólica basada en generadores asíncronos. En este sentido, posibles líneas de trabajo son:

- Incorporar al modelo de generador un modelo de turbina eólica, implementando el control del paso de pala, y aplicar series temporales de viento como entrada de potencia.
- Incorporar al modelo de simulación sistemas de protección ante huecos de tensión, como por ejemplo compensadores serie (DVR) o paralelo (STATCOM), sistemas *crowbar* para protección del convertidor rotórico, etc.
- Estudiar la respuesta obtenida respecto de los requisitos que los operadores eléctricos establecen (Ver anexo).
- Aplicar al modelo otras perturbaciones de la tensión como son sobretensiones y cambios en la frecuencia, tal y como establece el borrador del *PO 12.2 de Red Eléctrica de España* que entrará en vigor el 1 de Enero de 2011, y que establece la obligatoriedad de que los generadores soporten estas perturbaciones.

7. Bibliografía

Libros y publicaciones:

- [1] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia*, Ed. McGraw Hill, 1995.
- [2] J.L. Rodríguez Amenedo, J. C. Burgos Díaz, S. Arnaltes Gómez, *Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica*, Ed. Rueda, 2003
- [3] J. L. Taberna, *Comportamiento de generadores eólicos con máquina asíncrona doblemente alimentada frente a huecos de tensión*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Navarra, 2008.
- [4] J. S. Feito, *Máquinas eléctricas*, Prentice Hall, 2002.
- [5] J. P. da Costa, *Contribuição ao estudo da máquina assíncrona trifásica duplamente alimentada aplicada a aerogeneradores de velocidade variable*, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, Brasil, 2006.
- [6] L. G. Pesquer, *Efectos de los huecos de tensión en las máquinas de inducción y en los transformadores trifásicos*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Enero de 2006.
- [7] M. H. J. Bollen, *Understanding power quality problems. Voltage sags and interruptions*, IEEE Press series on power engineering, New York, 1999.
- [8] P.C. Krause, O. Wasynczuk and S.D. Sodhoff, *Analysis of electric machinery and drive systems*, IEEE press, Wiley-Interscience 43, no. 6, pp. 2555 – 2557, 2007.
- [9] P. Vas, *Electrical machines and drives, a space-vector theory approach*, Oxford Science Publications, Clarendon Press – Oxford, 1992.
- [10] PO 12.3. *Requisitos de respuesta frente a huecos de tensión de las instalaciones eólicas*, BOE No 254, pag. 37017, Octubre de 2006.
- [11] *Procedimiento de verificación, validación y certificación de los requisitos del PO 12.3 sobre la respuesta de las instalaciones eólicas ante huecos de tensión*, Versión 4, Asociación Empresarial Eólica, Marzo de 2008.
- [12] R. Datta, V. T. Ranganathan, “Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed wound rotor induction machine without position sensors”, in *Proc. IEEE Industry Applications Conference*, vol. 4, Phoenix, USA, October 1999, pp. 2623-2628.
- [13] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, “Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation”, *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.* Vol. 143, No. 3, May 1996.
- [14] T. Sun, Z. Chen, F. Blaabjerg, “Transient Analysis of Grid-Connected Wind turbines with DFIG After an External Short-Circuit Fault”, *Institute of Energy*

Technology, Aalborg University, DK-9220, Aalborg East, Denmark. Nordic wind power conference, Chalmers University of Technology. 2004.

- [15] UNE-EN 50160, *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*, Enero 2001
- [16] W. Leonhard, *Control of electrical drives*, 3rd Edition, Springer, 2001.

Páginas Web:

- [17] Danish Wind Power Association, www.windpower.org. Último acceso: Enero de 2009.
- [18] *Eólica 2008*, Asociación Empresarial Eólica, disponible en http://www.aeeolica.es/doc/Eolica_2008_baja.pdf, Último acceso: Febrero de 2009.
- [19] *Final Report on the disturbances of 4 November 2006*, disponible en <http://www.ucte.org/resources/publications/otherreports/>. Último acceso: Febrero de 2009.
- [20] Red Eléctrica de España, www.ree.es, Último acceso: Febrero de 2009.

Anexo

Requisitos que establece Red Eléctrica de España de respuesta frente a huecos de tensión de instalaciones eólicas.

Los siguientes ensayos son necesarios para la certificación del aerogenerador según el P.O. 12.3 de REE [10], [11]:

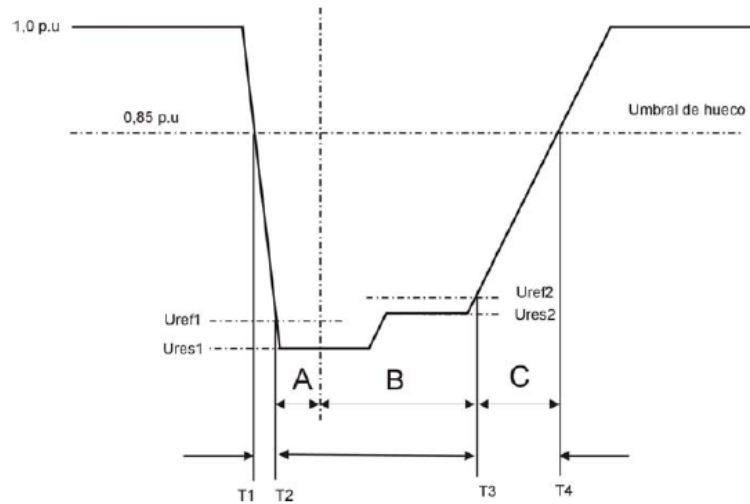
| Hueco | Profundidad | Duración | Potencia de la máquina |
|-----------|----------------------------------|---------------|------------------------|
| BIFÁSICO | 50-70 % $U_{\text{fase-neutro}}$ | ≥ 500 ms | 10- 30 % P_n |
| | | | 80- 100 % P_n |
| TRIFÁSICO | 10-23 % $U_{\text{fase-neutro}}$ | ≥ 500 ms | 10- 30 % P_n |
| | | | 80- 100 % P_n |

El aerogenerador objeto de ensayo debe permanecer conectado durante los huecos de tensión y cumplir los siguientes requisitos:

| HUECO TRIFÁSICO | REQUISITOS P.O. 12.3 REE |
|--|--------------------------|
| ZONA A | |
| Consumo de $Q < 15\% P_n$ (20ms) | -0,15 p.u. |
| ZONA B | |
| Consumo de $P < 10\% P_n$ (20ms) | -0,1 p.u. |
| Consumo de $Q < 5\% P_n$ (20ms) | -0,05 p.u. |
| $I_{\text{reactiva}} / I_{\text{total}}$ | 0,9 p.u. |
| ZONA C | |
| Consumo de $I_r < 1,5\% I_n$ (20ms) | -1,5 p.u. |

| HUECO BIFÁSICO | REQUISITOS P.O. 12.3 REE |
|-------------------------------------|--------------------------|
| ZONA B | |
| Consumo de $E_r < 40\% P_n$ (100ms) | -40 ms*p.u. |
| Consumo de $Q < 40\% P_n$ (20ms) | -0,4 p.u. |
| Consumo de $E_a < 45\% P_n$ (100ms) | -45 ms*p.u. |
| Consumo de $P < 30\% P_n$ (20ms) | -0,3 p.u. |

Las zonas se definen según se indica en la figura 1.



Caracterización del hueco de tensión en el ensayo de huecos de tensión

- Zona A: Todos los valores de tensión comprendidos entre el instante T2 y T2 + 150 ms.
- Zona B: Todos los valores de tensión comprendidos entre el instante T2 + 150 ms y T3
- Zona C: Todos los valores de tensión comprendidos entre T3 y el menor de los siguientes valores: T4 ó T3 + 150 ms